理解科学丛书·卢昌海科普著作

10 BILLION YEARS FROM PAST TO FUTURE

The Story of the Sun

上下百亿年

太阳的故事

卢昌海◎著

重返古希腊 天文自助游

阳光里的奥秘 大气里的谜团

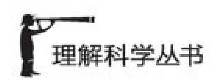
从地心说到日心说 从日全食到相对论

光子的逃亡 太阳的脉搏

小小的粒子 大大的模型

太阳的过去、现在和未来

清華大學出版社





上下百亿年

太阳的故事

卢昌海◎著

清華大学出版社
北京

目　录

图书在版编目（CIP）数据

上下百亿年：太阳的故事/卢昌海著.--北京：清华大学出版社，2015

（理解科学丛书）

ISBN 978-7-302-40762-1

Ⅰ.①上…　Ⅱ.①卢…　Ⅲ.①太阳—青少年读物　Ⅳ.①P182-49

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第161102号

责任编辑：邹开颜

封面设计：

责任校对：王淑云

责任印制：

出版发行：清华大学出版社

网　　址：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com

地　　址：北京清华大学学研大厦A座

邮　　编：100084

社总机：010-62770175

邮　　购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印刷者:

装订者:

经　　销：全国新华书店

开　　本：165mm×240mm　印张：12.5　彩页：2

字　　数：179千字

版　　次：2015年8月第1版

印　　次：2015年8月第1次印刷

印　　数：1～　000

产品编号：

内容简介

本书将带读者从一次虚拟的古希腊之旅开始，逐步深入地了解太阳的奥秘，以及人类为探索这些奥秘所付出的艰辛和努力，所获得的成果和教训。除介绍知识外，本书还穿插了少许章节，引导读者运用逻辑推理及初等几何知识，再现古希腊先贤们的某些精彩推理，以及运用含义简明的物理学原理，推算太阳的某些物理参数，亲身体验科学探索的感觉。

本书融语言的生动风趣与内容的严谨翔实于一体，让读者在享受阅读愉悦的同时学到丰富的知识，并体验科学探索的严谨及科学发现的激动人心。本书适合广大天文爱好者及大、中学生阅读。

序言

《太阳的故事》初版于2011年，是我的第二本书，也是我迄今所有书中最受冷遇的一本。如今，清华大学出版社以不怕亏损的绝大勇气为此书出修订版，本该“避亲”的我也不便袖手旁观，就厚颜为此书“吆喝”几句吧。

《太阳的故事》虽然书名超土，题材也不稀有，但在我眼里，却是比其姊妹篇《寻找太阳系的疆界》[1]写得更用心力并且也更好的。为什么呢？因为后者是单纯的“历史题材”，而且是“寻找太阳系的疆界”这单一领域内的历史，受到惯常的全局性时间顺序的限制。昔日鲁迅的《中国小说史略》被诬为抄袭时，鲁迅在回应时说过这样一句话：“自然，大致是不能不同的，例如他说汉后有唐，唐后有宋，我也这样说，因为都以中国史实为‘蓝本’。我无法‘捏造得新奇’。”像《寻找太阳系的疆界》那样的题材也有类似的尴尬：别人依天王星、海王星、冥王星的顺序写，我也只能这样写。不仅如此，由于“寻找太阳系的疆界”是比“中国小说史”还单一得多的领域，就连每个行星的发现者、发现过程等也都没得挑拣，更遑论“捏造得新奇”。因此对作者来说，虽可作——并且也作了——文笔上的发挥、细节上的考辨，以及局部结构上的规划等，总体的写作自由度是比较小的，相应地，独特性也就比较低。

《太阳的故事》则不同，它侧重于历史但不是单纯的“历史题材”，而是科普与科学史的融合；而且它的历史部分也并非单一领域内的历史，而是涉及天文和物理的多个分支。这种复杂性给了作者很大的写作自由度。作为结果，《太阳的故事》的整个结构——以“穿越”而始，由

几何至物理，从核心到外围，最后以太阳“通史”为终——都是我自己规划，并且自认为比较独特的。这其中以《重返古希腊》为开篇的“穿越”式写法更是我很久以前就萌生的一个写作思路的贯彻，在我自己是颇为珍视的。另外，从内容上讲，《太阳的故事》涉及的知识点比《寻找太阳系的疆界》多得多，对科学方法和科学探索过程的介绍也深入得多；在写作过程中，则参阅和甄选了多得多的资料。这些对作者来说都是更用心力并且也更好的地方。

因此，《太阳的故事》出修订版是我非常乐意见到的。

不过另一方面，我也必须坦白，这修订版所“修订”的基本上也就只是“版”，以内容而论实在是微不足道的（因此已有初版的读者不必再次破费）。这一点其实是我所有作品的修订版共有的特点。之所以如此，主要是——如我在《小楼与大师：科学殿堂的人和事》[2]一书的自序中所述——由于我写作速度较慢，“使得写作过程往往长到了对题材的兴趣将尽而书稿远未完成的程度”。由此造成的后果，则是书稿的完成之日，往往也就是兴趣的透支极限，从而在很长的时间之内都不会再对同一题材感兴趣，更不会去修订。从某种意义上讲，一本书出版后，在我眼里它本身也就成为了历史，除订正笔误外，在文字上我一般是让它维持原貌的。对这种有懒惰之嫌的做法，容我略作辩白：我作为一个喜欢买书的人，屡次吃过大幅变更内容的“修订版”的亏。比如有一年我买了一套有关民国大师的三卷本的“大书”，还没高兴太久，就听说该书出了修订版，“新增10万字全新内容”，让“故事真正完整”。那一刻的心情，固然有一分是叹服作者的勤奋，却有九分是为自己的版本缺了“10万字全新内容”，及故事的并非“真正完整”而沮丧。我希望，喜欢我作品的读者无需在短短几年间就尝到同样的沮丧——当然，前提是作品本身不会在那样的时间内过时，而这，我寄望于写作时付出过的心力，以及科

学史这个我所侧重的领域本身的相对稳定。

最后，让我以对修订之处的罗列，来结束自己的“吆喝”吧：

（1）增添了一篇“序言”（即本文）。

（2）订正了几处笔误（大都为措辞、标点、译名的微调）。

（3）变更了书名——《太阳的故事》这个超土的书名作为本书受冷遇的替罪羊，遭到了编辑的撤换。我效仿昔日的历史畅销书《上下五千年》，提议了《上下百亿年》这一新书名。

（4）增添了一些手绘插图。

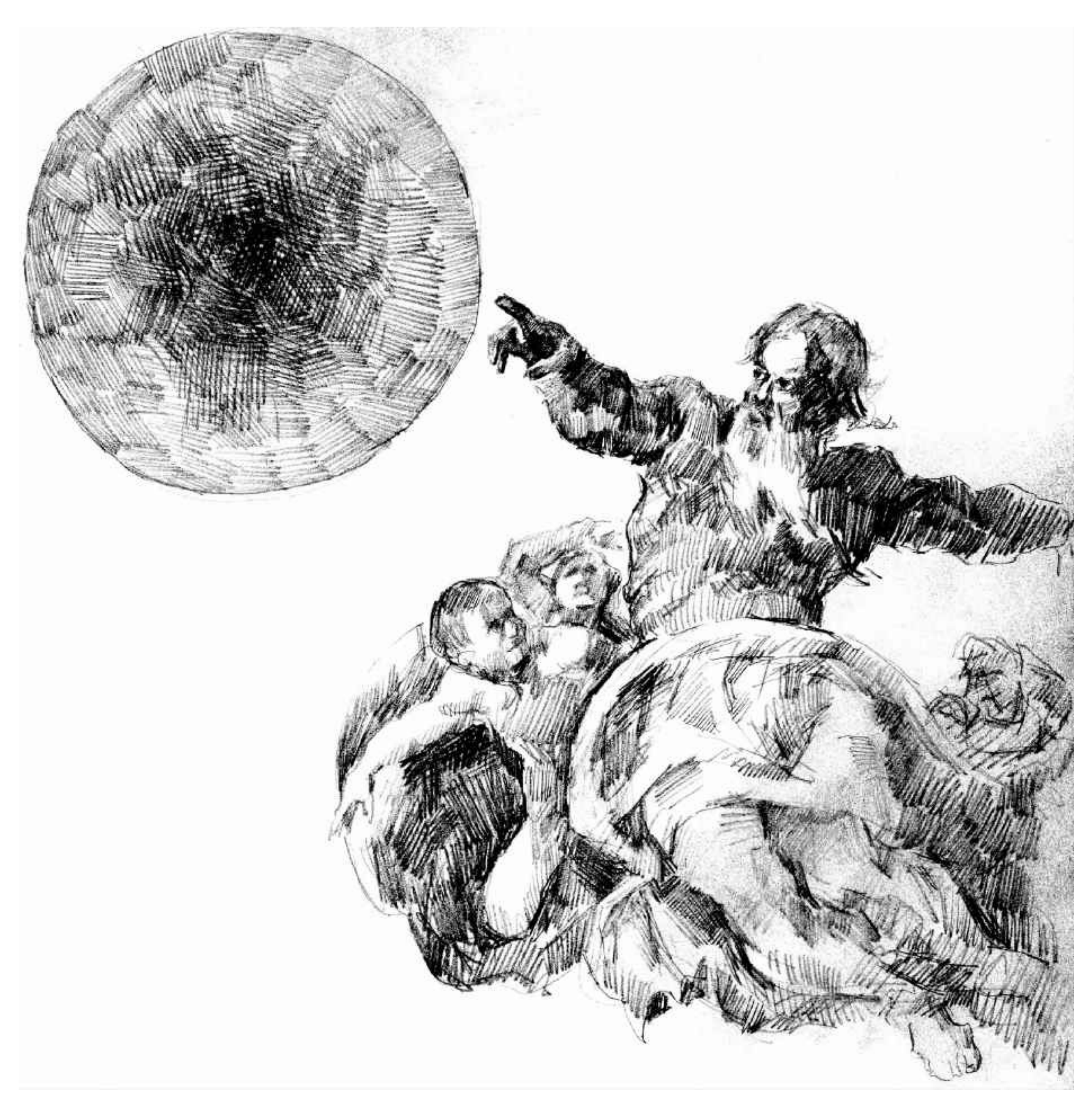
（5）增添了人名和术语索引。

以上就是对这本修订版的说明，但愿有更多的读者注意到并喜欢上本书。

---

[1]《寻找太阳系的疆界》由清华大学出版社初版于2009年，修订版更名为《那颗星星不在星图上：寻找太阳系的疆界》，于2013年出版。

[2]《小楼与大师：科学殿堂的人和事》由清华大学出版社出版于2014年。



绘画：张京

1　重返古希腊

说到天文学，很多人的眼前都会浮现出深邃的天幕和宝石般闪亮的星辰。其实，在我们这个小小星球上所能看到的最显眼的天文现象并不在黑夜，而是在白天。

在每一个晴朗的白天，天空中都挂着一个极为显眼的天体：太阳。

对于像太阳这样显眼的天体，我们当然不必问它是什么时候被发现，以及怎样被发现的，因为那显然跟人类本身同样古老，跟睁开眼睛同样直接。但是，除了这两个不必问的问题外，有关太阳的其他问题可就大都不是省油的灯了，有些甚至直到今天也没有确切答案。不过虽然不“省油”，它们点亮的却是人类的智慧。从某种意义上讲，对这个天空中最显眼的天体的持续探索，对那些“不省油”的问题的认真求解，是人类从睁开眼睛看世界，到逐渐理解世界的某些方面所走过的几千年漫漫长路的一个缩影。

现在就让我们从那些问题当中最简单的两个说起吧：太阳有多大？它离我们有多远？

这两个问题的答案，在今天也许已是很多小学生都知道的常识——不就是两个数字嘛。但是，这两个问题的答案果真只是两个数字吗？让我们来作这样一个设想，假设我们用时间机器把一位知道这两个数字的小学生送回人类文明发源地之一的古希腊。我们想知道的是：这位来自21世纪的小学生能做什么？

显然，单以某些知识——比如有关太阳有多大和离我们有多远的这

两个数字——而论，他（她）已经远远胜过了古希腊的任何一位先贤。但我们会在从古希腊流传下来的史书中读到有关这位博学强记的小学生的故事吗？他（她）能凭那些博学强记的知识就成为令后世之人高山仰止的先贤中的一位吗？我想答案是否定的。原因很简单，知道两个数字和让别人理解并信服那两个数字是完全不同的事情，后者恐怕不是每一位小学生能够做到的。如果仅仅能说出两个数字，却无法让别人理解和信服，那只会被当成信口开河，而不会被载入史书。

那么，假如不是小学生，而是本书的读者，您有幸（或不幸）被送回到了古希腊，您有办法让那些喜爱思考的古希腊先贤们相信那两个数字，相信天空中那个看上去只有贝壳大小的太阳其实是肚子里能装下一百多万个地球的庞然大物吗？或者换一个说法：若是您被送回到了古希腊，却忘记了那两个数字，您有办法凭自己的能力，以一种令人信服的方式重新找回它们吗？或者更一般地，如果您站在了古希腊的天空下，却忘记了所有的天文知识，您能凭借自己的能力找回其中的多少呢？

让我们就从这个假想的问题开始重温一下人类智慧的启蒙时代，并从那里开始讲述我们有关太阳的故事吧。

要想找回已被忘记的天文知识，您要做的第一件事情显然就是仰望天空，因为那里——并且只有那里——才是天文知识的直接来源。如果您的仰望天空只是偶一为之，您也许会觉得天上的日月星辰都是静止的，因为它们当中没有一个会像飞鸟一样在一瞥之下就让人察觉它们的移动。但即便如此，您也会在一天之内就发现太阳的东升西落，因为它直接影响到周围环境的明暗和冷暖。要发现月亮的运动也很容易，因为在任何一个有月亮的夜晚，您仰望天空时都很难不注意到这个独一无二的天体，而一旦注意到它的存在，那么在下次仰望天空时，就很难不注意到它的位置变化。

对一般人来说，自己所能发现的天文知识也许就到此为止了。天上除日月之外虽然还有很多星星，星星虽然也和日月一样东升西落，但一个视力良好的人在一个晴朗的夜晚所能看到的星星有几千颗之多，若非特别留意，除了有一种繁星似尘的感觉外，恐怕是不会对其中任何一颗星星留下具体印象的。而如果没有对任何一颗星星留下具体印象，那么在下一次仰望天空时就很难注意到它们的移动。

要想找回尽可能多的天文知识，您当然不能像一般人那样过目就忘。为了研究星星的运动，您开始进行细致的观测，并对不同时刻每颗星星的位置进行记录。您很清楚，观测越细致，记录越详尽，有可能找回的天文知识就越丰富。由于在苍穹之上缺乏参照，不易度量位置或角度，您也许会想到在地上立一些固定的物件作为参照，如果手下有一些可以使唤的人的话，您也许还会想要设计建造一些更复杂的参照物，那些东西若是建得足够牢固，以至于能一直保留到今天的话，就会变成重要的历史遗迹：古观象台。

无论您的记录详尽还是粗略，只要记录了，哪怕只记录几天，您也会发现所有的星星都和日月一样东升西落。用后世的术语来说，这是天体的周日视运动（apparent diurnal motion），如图1.1所示。由此您也许还会进一步总结出一个规律，那就是日月星辰都在围绕着地球转动。在历史上，这是著名的地心说（geocentric model），它后来受到宗教势力的维护，成为垄断天文界长达两千年的正统理论。随着观测数据的积累，以后您会发现很多理由让您放弃这一理论。它后来也的确被放弃了。在某些后世之人的眼里它甚至有些声名狼藉（那其实是宗教惹的祸）。但在一开始，在只有粗略观测数据的年代里，它是一种既符合观测数据，又符合直觉的理论。您有理由为发现这一理论而自豪。周日视运动的发现也意味着您已经发现了“日”这个时间计量单位，它是周日视

运动的周期，也可以说是昼夜交替这一粗糙周期概念的精细版。[1]



图1.1　星星的周日视运动

当您的天文观测坚持到几十天时，除了周日视运动外，您还会注意到另一种很重要的天文周期现象，那就是月相（phases of the moon）的变化（彩图2）。与太阳总是圆的，以及星星总是像一个点不同，月亮这个夜空中最显眼的天体在不同日子里会呈现不同的形状：有时是满月，有时是半月，有时则是弯月。这种变化被称为月相的变化，它大约每隔29.53天重复一次。注意到这种有趣而美丽的周期现象，意味着您发现了“朔望月”（synodic month）这一时间计量单位。很多早期的文明都曾用过这一时间计量单位，直到今天它仍有一定的应用，是阴历（lunar calendar）这一历法的基础。[2]

当您的天文观测坚持到十几个月时，除了周日视运动和月相的变化

外，您还会发现一种更缓慢的天文周期现象。您会注意到在太阳升起和落下的时候，天空中依稀可见的那些星星的位置在一天天缓慢地改变着。这种缓慢改变的逐渐积累，使得在不同的季节里，伴随太阳升起和落下的星星是不同的。这说明什么呢？说明太阳在背景星空中的位置不是固定的，除了周日视运动夕卜，它还参与了一种更加缓慢的运动。仔细的观测表明，那种运动大约每隔365.24天重复一次，它既沿东西方向，也沿南北方向，与周日视运动所在的平面有一个23.4°左右的夹角，这个夹角决定了太阳在冬天和夏天所能到达的最大纬度——即南北回归线的纬度。注意到了那种运动，意味着您发现了所谓的太阳周年视运动（apparent yearly motion）以及“年”这一时间度量单位，后者是太阳周年视运动的周期，也可以说是四季变化这一粗略周期的精细版。[3]

您不知疲倦地坚持着自己的天文观测，当头发都快花白了的时候，您在天空中又发现了一些更微妙的运动。您会发现在那看起来彼此相似的满天繁星之中，有五颗星星的位置与日月一样相对于背景星空在缓慢地移动着，其中有几颗星星的移动方式还相当复杂，比如有时会停止，有时还会逆行。如果您发现了这些被后人称为行星表观视运动（apparent motion of planets）的现象，那表明您已经发现了金、木、水、火、土五大经典行星。除了这些发现以外，在经年累月的观测中您还会偶尔发现一些流星和彗星，并观测到一些日食和月食。

在古希腊的条件下，您自己所能从事的天文观测大致就是这些。不过，假如您能有幸找到一些前人留下的观测记录的话，您也许能通过将彼此的记录相互比较，而发现一种在自己的有生之年里很难单独发现的东西，即周日视运动的轴线本身的缓慢转动。这种转动的周期约为25 800年。这一现象用后世的术语来说就是所谓的地球自转轴的进动（precession of the Earth's rotation axis）。在它的影响下，因距离北天极

（即周日视运动的轴线北端）很近而被称为北极星（Polaris）的小熊座α星（α Ursa Minor）在几千年后将会失去北极星这一光荣称号。

完成了上面这些观测发现，您就不仅凭借自己的能力赶上了古希腊先贤们在观测天文学上曾经达到过的水准，而且也基本上穷尽了17世纪之前天文学上几乎所有重要的观测发现。罗列起来似乎不难，做起来却不无艰辛。在不知不觉间，您这位来自21世纪的人，已几十年如一日地将古希腊人的天文事业当成了自己的事业。（这是一种什么精神？）

不过，这些天文发现虽然了不起，却还不足以让您被写入史书。因为眼睛是人人都有的，很多勤奋的普通人——其中既有古希腊人，也有其他古文明国度的人——也能作出同样的发现。真正将智者区别于普通人的除了勤奋，还有智慧。例如几何与推理的能力，这种能力无疑是一种智慧。现在您就要用自己的智慧来做一些单纯的天文观测无法做到的事情。比方说，您要寻找前面提到过的那两个数字：太阳的大小以及它离我们的远近。

没有谷歌（Google），没有百度（Baidu），而且也没“病”（Bing），您有办法自己找出那两个数字吗？

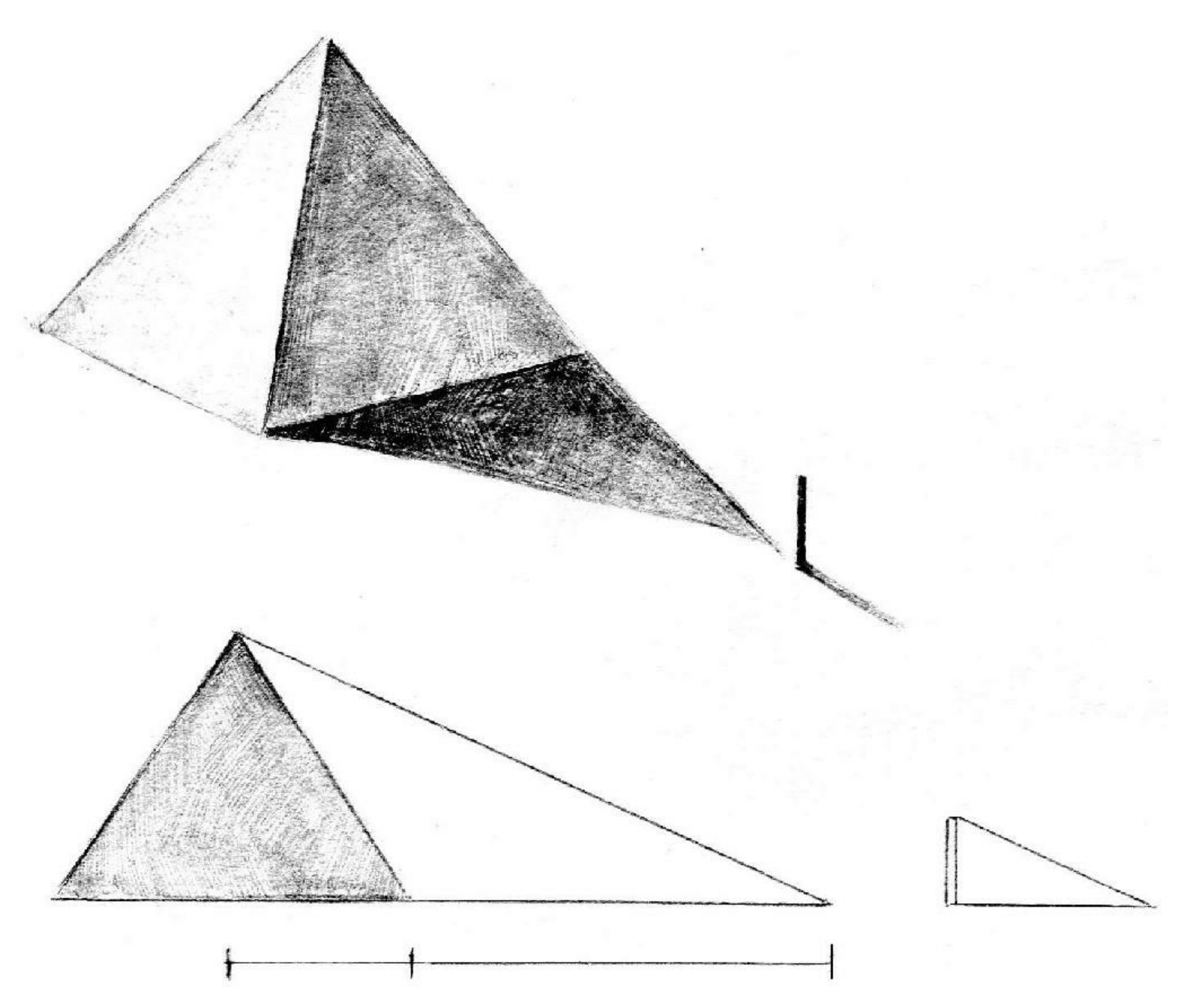
---

[1]从周日视运动的周期中衍生出的“日”的概念其实不止一种：由同一颗星星（行星除外）在两个相邻夜晚经过天空中同一个位置的时间间隔所定义的“日”称为恒星日（sidereal day）；由太阳在两个相邻白天经过天空中同一个位置的平均时间间隔所定义的“日”则称为平均太阳日（mean solar day）。由于后文即将提到的太阳周年视运动的影响，平均太阳日比恒星日长了约3分56秒（感兴趣的读者可以用本节给出的数据自行推算一下这两种“日”的差异）。由于太阳与我们日常

生活的关系远比星星密切，我们在普通日历中所用的“日”是指平均太阳日。细心的读者可能会问：平均太阳日中的“平均”二字是什么意思？那是指将地球公转轨道等效为一个平均圆轨道，以避免“日”的长短受地球公转轨道的椭圆性影响。当然，不作那样的平均也可以谈论“日”这个概念，那样的“日”被称为表观太阳日（apparent solar day），它的长短会随季节而变。

[2]朔望月这一中文名称中的“朔”指的是新月，“望”指的是满月。要注意的是，朔望月只是月相变化的周期，而不是月球绕地球公转的周期，后者是所谓的恒星月（sidereal month），只有27.3天（感兴趣的读者可以用本节给出的数据自行推算一下这两种“月”的差异）。另外，朔望月不同于以太阳周年视运动为基础的阳历（solar calendar）中的月。之所以不同，是因为朔望月并不恰好等于阳历中一年的十二分之一，如果我们用它来表示“月”，就无法与“年”合拍，由此会导致很多不方便之处，比方说北半球的7月就无法稳定地对应于夏天（因为当“年”和“月”的不合拍累积到六个月时，它就会变成冬天）。不过有得就有失，阳历中的“月”虽然保证了与“年”的合拍，却失去了表示月相的作用，比方说“中秋月圆”在阳历中就没有一个固定的日子。由于太阳与我们日常生活的关系远比月亮密切，我们日常所用的“月”是指阳历中的月。

[3]确切地说，这个“年”是所谓的回归年（tropical year），它比地球绕太阳的公转周期，即所谓的恒星年（sidereal year）短了约20.4分钟，这两者的差异是由后文即将提到的地球自转轴的进动造成的（感兴趣的读者可以用本节给出的数据自行推算一下这两种“年”的差异）。我们在阳历中所用的“年”是指回归年。



绘画：张京

2　天文自助游：推算太阳的大小和远近

虽然您要寻找的数字有两个，但很清楚，实际上只要找到其中一个就行了。因为太阳就在天上，它看起来有多大您早就知道了，它的真实尺寸越大，意味着离我们越远，反之，真实尺寸越小，意味着离我们就越近。这表明，在太阳的大小和远近这两者之间存在完全确定的关系，只要知道任何一者，就可以推算出另外一者。

那么，在大小和远近这两者之间您该选择哪一者入手呢？从兴趣上讲，您也许会对大小更感兴趣，因为那才是属于太阳本身的性质，但实际上，您却只能从远近入手。对于普通物体来说，这两种选择并无多大分别，只要用一把尺子，您爱测量哪一个都行。可惜太阳却并非普通物体，您无法直接拿一把尺子去测量它的大小。当然，您同样也无法直接拿一把尺子去测量它的远近。但您知道，测量物体的远近有一种很常用的间接方法，那就是通过从两个不同的观测点来观测物体，然后利用观测到的角度差异——即所谓的视角差异——来推算它的远近。这种被称为三角视差法（triangulation）的方法从古至今都是测量远近的重要手段（图2.1）。事实上，远在其基本原理被理解之前，我们的大脑和眼睛就已在本能地采用这种方法了，我们的大脑正是利用了左右两眼之间的视角差异，来判断物体远近的。[1]

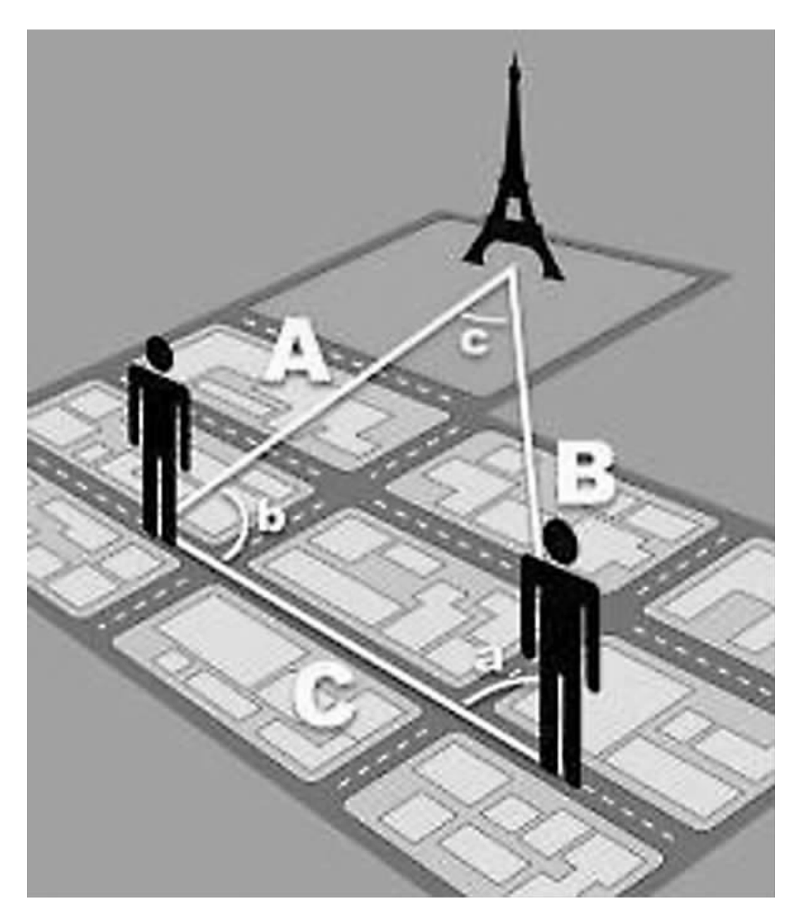


图2.1　三角视差法

但当您试图用三角视差法来测量太阳的远近时，却遇到了巨大的麻烦。三角视差法需要两个观测点，但您很快就发现，从您能够走得到的相距无论多远的两个观测点去看太阳，那视角差异都太小了。地球表面的弧度，地形的细微起伏，乃至您的观测误差都远比您要测量的视角差异大得多。在这种情况下进行测量，犹如在惊涛拍岸声中去倾听远处一只水龙头的滴水之声，您就算长一对兔耳朵也不够用。

怎么办呢？在哪儿才能找到第二个观测点呢？

您冥思苦想了一整夜。当黎明的曙光照到您身上时，您把目光投向了天空。在那里，您看到了一轮淡淡的上弦月（在北半球，上弦月是指右半边可见的“半月”）。看见它，您心中忽然闪过一片灵光，激动得几

乎要像传说中的阿基米德（Archimedes，公元前287—前212）那样一边裸奔，一边大叫："我找到了！"[2]

是的，您找到了，您终于找到了第二个观测点，那就是月亮！

别紧张，您没喝酒，您并不是要到月亮上去观测。在古希腊时代人们就已知道，月亮的月相变化并不是月亮本身在变（在古希腊人眼里，天上的东西是永恒不变的），而只是因为阳光从不同角度照射月亮所致。在刚才看见月亮的一刹那，您忽然想到，既然月相是阳光从不同角度照射月亮所致，那它实际上是在告诉您阳光照射月亮的方向，从而也就是太阳相对于月亮的方向。利用这一点，您无需登上月亮就可以推算出从月亮上看太阳的角度，这等于是为您提供了第二个观测点。

特别是，当您看到的月亮恰好是上弦月时，您的视线方向与阳光照射月亮的方向正好是垂直的（图2.2）。这时候如果您记录下太阳的方向，那么它与月亮方向的夹角的一边是月亮到地球的距离，另一边则是太阳到地球的距离，而它的一个邻角恰好是直角。这样简单的三角关系对于即将跻身古希腊先贤行列的您来说无疑是小菜一碟，那两个距离的比值就等于那个夹角的余弦值（cosine）。事实上您还知道，那个夹角的余弦值不仅给出那两个距离的比值，而且还给出了月亮直径与太阳直径的比值。之所以如此，是因为在太阳和月亮之间存在一个美妙的巧合，那就是它们看起来几乎是一样大的。[3]对于两个看起来一样大的天体，它们与我们距离的比值显然就等于它们直径的比值。

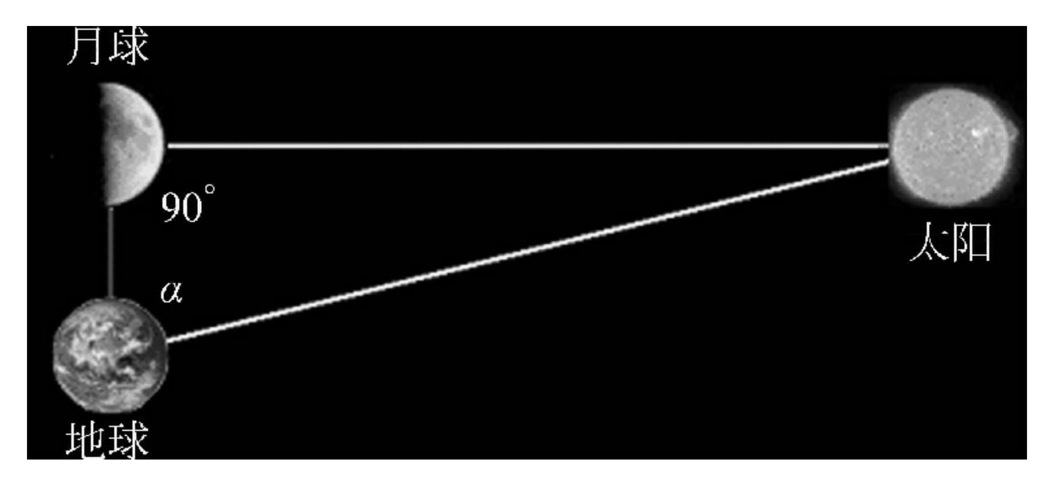


图2.2　太阳、地球与上弦月的相对方位

看来那个夹角很重要，但它究竟是多少呢？那就得靠观测了。不幸的是，那是一个难度很大的观测，因为那个夹角非常接近90°，接近到了让您无法分辨的程度。而且在那个夹角如此接近90°的情况下，一些在古希腊时代不为人知的因素，比如地球大气对阳光的折射，将足以对结果造成不可忽视的干扰。（感兴趣的读者请想一想，那种影响会使观测到的太阳距离偏大还是偏小？）但不管怎么说，您的方法是正确的，并且即便在当时也有一定的可行性。如果现代人用您的方法来做观测并扣除干扰的话，将会发现那个夹角在89°5′～89°52′之间。由此得出的结论将是太阳的直径约为月亮直径的400倍，或者等价地，太阳与我们的距离约为月亮与我们距离的400倍。[4]

这个结果无疑是漂亮的，但与您所要的答案仍有差距，因为它只是把有关太阳的数字和有关月亮的数字联系在了一起，除非您有办法知道有关月亮的数字，它并不能提供您所要的答案。那么，您有办法知道有关月亮的数字，即月亮的大小或月亮离我们的远近（这两个数字您也只要知道其中一个就行了）吗？答案是肯定的。

在常年的天文观测中，您和其他古希腊先贤们一样，已经知道月食

是由于地球挡住了射向月亮的太阳光所致。您并且还注意到，当地球的影子——确切地说是本影（umbra），即完全阻隔阳光的那部分影子——“蚕食”月亮时，影子的边缘是圆弧状的（这是最早使人推测地球为球形的现象之一）。您很快就想到，通过对比影子边缘的形状与月亮本身的形状，您就可以估计出地球影子与月亮的相对大小。不过，这种方法实践起来并不容易，因为地球的影子投射在球状的月亮上并不是一个很简单的几何问题。您想到的一个更好的方法，是对月亮进入地球影子与它穿过地球影子所花的时间进行比较。在前一段时间里，月亮移动的距离等于它自己的直径，在后一段时间里，它移动的距离等于地球影子的直径。因此这两个时间的比值就等于月亮与地球影子的直径之比（当然，这种办法必须要在月亮恰好从地球影子正中间穿过的那种特殊的月食下才能得到可靠的结果）。

如果您进行了那样的测量，您也许会得到一个很接近正确的结果，即地球影子的直径约为月亮直径的2.66倍。[5]当然，这个地球影子的直径是指地球影子在月亮轨道附近的直径，它要比地球本身的直径来得小（图2.3）。到底小多少呢？几乎恰好小了相当于一个月亮直径的大小（这个结果不是偶然的，感兴趣的读者可以结合太阳比地球大得多，以及太阳和月亮看起来几乎一样大这两点来自行证明一下）。把这个因素考虑在内，您就得到了另一个重要结果：地球的直径约为月亮直径的3.66倍。

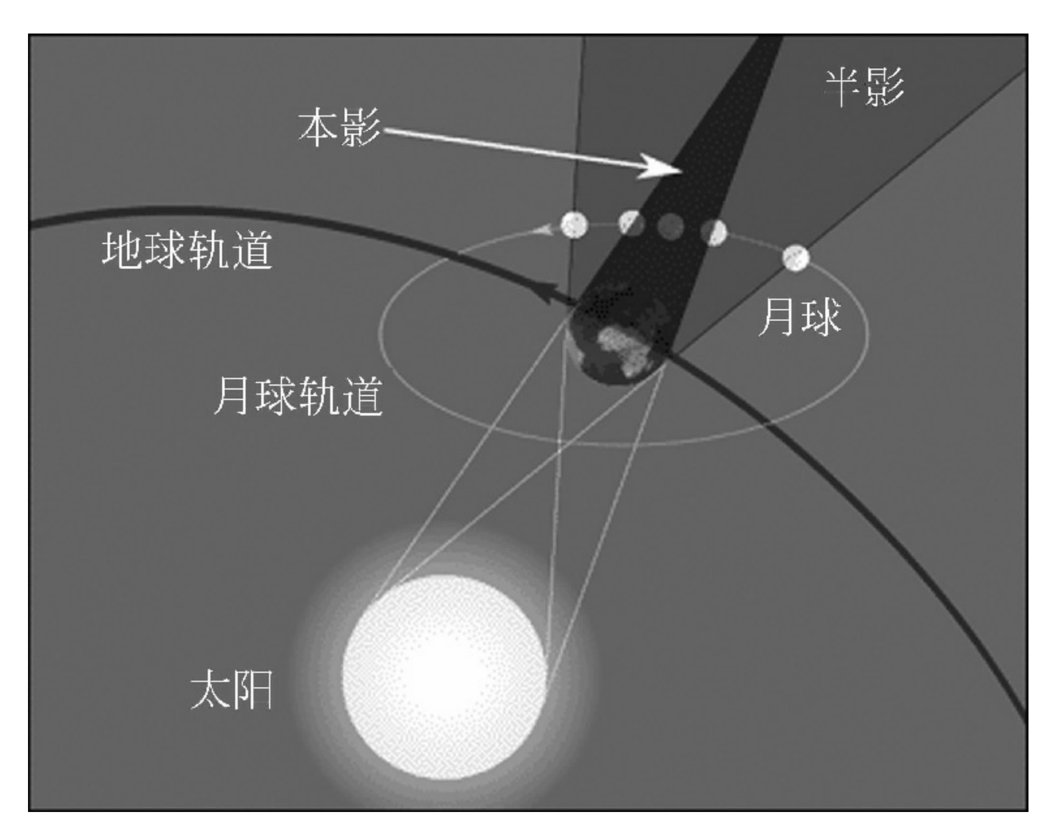


图2.3　测定月亮与地球的相对大小

将这个结果与前面的结果联系在一起，您就发现了太阳的直径约为地球直径的109倍。这个结果意味着太阳是一个庞然大物，在它肚子里可以装下130万个地球——顺便说一下，这是指剁碎了装。如果要问最多能装多少个完整的地球，那可就变成一道著名的数学难题了。[6]

就像接力一样，您先把有关太阳的数字与有关月亮的数字联系起来，现在又进一步将它与地球的直径挂上了钩。凭借几何与推理的力量，一个天文问题已被您转变成了地理问题。但问题是，地球虽然就踩在您的脚底下，它的直径却仍然不是可以拿尺去测量的。事实上，在古希腊时代，多数人一生的活动都局限在几千米的范围内，对他们来说，地平线以外的东西就像天边一样遥远。更不用说地球表面的大部分地区被当时还从未有人探索过的汪洋大海所覆盖。

不过您当然不是普通的古希腊人，您总是有办法的。

在所有使人推测地球是球形的天文现象中，除了前面提到的月食时地球影子的边缘形状为弧形外，还有一个很重要的现象，那就是不同纬度的人看到的星空是不一样的。具体地说，那些熟悉的星星或星座在不同的纬度上看时，与天顶的夹角是不一样的。（请读者想一想，为什么我们只提纬度而不提经度？）不仅星星如此，太阳也一样。住在北回归线附近的人大都知道，盛夏正午的太阳是位于天顶正中央的（证据是阳光能直射到垂直深井的底部），而住在北回归线以北的您却发现盛夏正午的太阳是在天顶偏南方向的，具体偏南的角度可以用一根立在地上的垂直杆的投影来计算。这个角度占整个圆周的比例显然就等于您与北回归线的距离（这对您来说是可以测量的）占整个地球周长的比例。由此您就可以计算出地球的周长和直径。经过这样的测量和计算，您发现地球的直径约为12 740千米（当然，这是改用后世的距离单位来表示了）。[7]

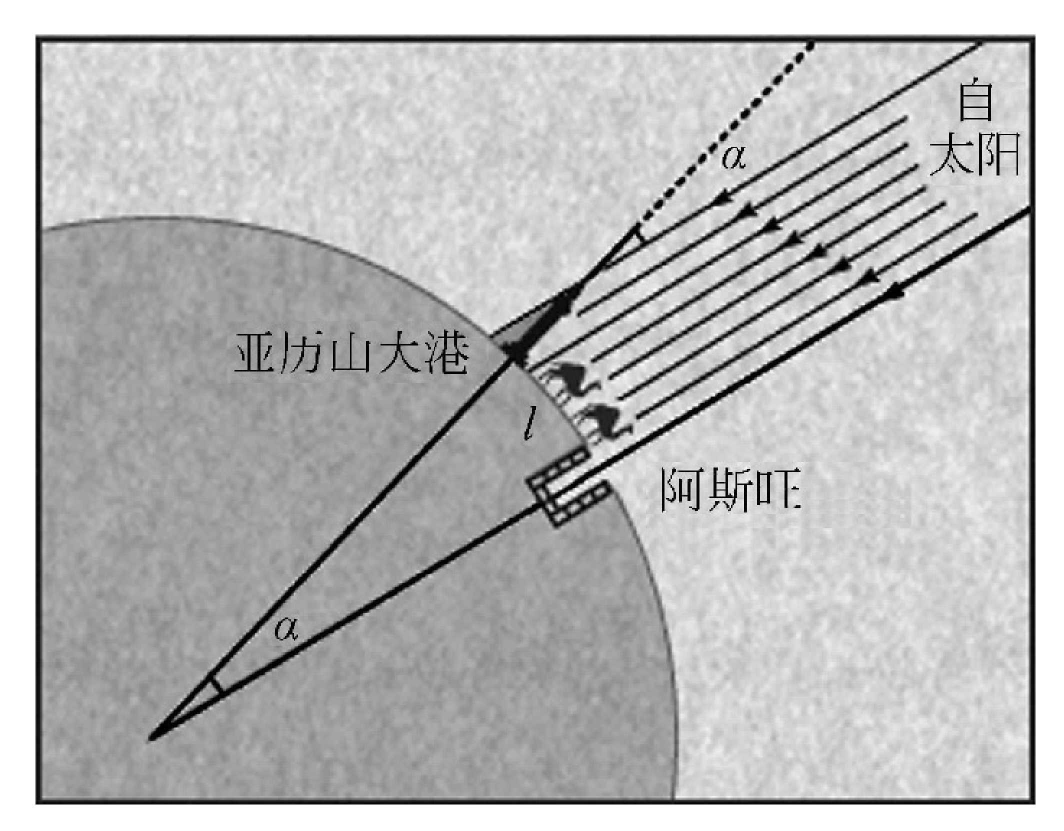


图2.4　测量地球的大小

这样，您就完成了一个漂亮的“三步走战略”：先从太阳到月亮，再从月亮到地球，最后归结到地面上的两个地点，步步相连，环环相扣。将这些环节联系在一起，您就得到了有关太阳的第一个数字：太阳的直径约为139万千米。由此您当然也可以推算出另一个数字：太阳离地球约有1.5亿千米（感兴趣的读者可以脚注提供的数据自行推算一下）。如果您愿意，您还可以写下有关月亮的两个数字：月亮的直径约为3 500千米，它离地球约为38万千米（更精确的数字是384 400千米）。[8]

站在我们这个小小星球上，居然能推算出如此遥远天体的性质，这是一件奇妙的事情。在本书的其他章节中，在后来的科学发展史上，这样奇妙的事情还将一再发生。事实上，直到今天为止，除少数飞往过月球，或在近地轨道上生活过的宇航员外，几乎所有人的足迹都从未离开过我们这个小小的星球（包括大气层），但我们却对越来越广阔的外部

世界有了越来越精密的了解。这种能力就是智慧。当然，我们在这里替您稍稍粉饰了一下，限于当时的观测条件，您在数值上是不可能得到像上面那样接近正确的结果的。但对于那个时代来说，最重要的不是数值，而是方法，那一系列精巧的方法足以使您当之无愧地跻身于人类最伟大的先贤之列，永载史册。

您的古希腊虚拟人生兼自助游到这里就结束了，但我们的太阳故事才刚刚开始。接下来，我们将追随历史的足印去探究另外一些重要问题：比如那个肚子里能装下一百多万个地球的庞然大物究竟是什么？它真的是在围绕小小的地球转动吗？再往后，我们还将一起去探究许许多多更现代、更奇妙当然也更困难的问题。

---

[1]不仅人类如此，就连某些无法直接利用双眼视差的动物，比如鸽子，也会通过移动自己的脑袋来造成不同的视角，进而判断物体的远近（鸽子虽有两只眼睛，但视野并不重叠，从而不能像人类一样直接利用两只眼睛的视角差异，而只能采用移动脑袋这样的“下策”）。

[2]传说阿基米德受国王所托，要鉴定一顶皇冠是否掺了杂物。他苦思良久，最终在洗澡时悟出了用浮力进行鉴定的方法，欣喜若狂的他连衣服都没穿就冲出浴室大喊：“我找到了！”这个故事并未被记录在阿基米德著作之中，它的真实性后来引起了一些有趣的争议。

[3]确切地讲，由于地球绕太阳和月亮绕地球的公转轨道都是椭圆，太阳和月亮看起来的大小都不是不变的。其中太阳的角直径最小时为31′27.7″，最大时为32′31.9″，平均为31′59.3″；月亮的角直径最小时为29′23.0″，最大时为33′31.8″，平均为31′5.3″。我们在后文中将会看到，月亮的角直径有时比太阳大，有时又比太阳小这

一特点对于日食的种类有着很重要的影响。

[4]在历史上，古希腊先贤阿里斯塔克斯（Aristarchus，公元前310—前230）曾经用这种方法进行过测量。他估计出那个夹角为87°，与实际数值只相差不到3°。可惜对于这种很接近90°的角度来说，哪怕只相差1°也足以造成很大的误差。阿里斯塔克斯估算出的太阳直径只有月亮直径的18～20倍。

[5]在历史上，这个方法也同样被阿里斯塔克斯采用过，他估计出的地球影子直径约为月亮直径的两倍，由此得到的太阳直径约为地球直径的7倍。这个结果虽然误差极大，但——如我们在下一章中将会提到的——仍给了阿里斯塔克斯一个很重要并且很正确的启示。阿里斯塔克斯之后的其他先贤们对地球影子的直径给出了更好的估计，比如希帕克（Hipparchus，公元前190—前120）给出的估计为月亮直径的2.5倍；托勒密（Ptolemy，90—168）给出的估计为月亮直径的2.6倍。

[6]这个数学问题被称为“开普勒猜想”（Kepler Conjecture），是一个著名的数学难题。1998年，美国数学家黑尔斯（Thomas Hales，1958— ）发表了一个长达250页，并且需要计算机辅助的证明，但该证明迄今尚未得到数学界的公认。

[7]在历史上，古希腊先贤埃拉托斯特尼（Eratosthenes，公元前276—前195）曾经用这种方法估算过地球的周长。图2.4中那两个城市（即阿斯旺和亚历山大港，纬度分别为24°05 N和31°02 N）就是埃拉托斯特尼所选的观测点。由于史学界对埃拉托斯特尼所用的距离单位尚有争议，今天我们尚无法确切知道他的估算结果，但一般认为是在39 690～46 620千米之间（相应的直径在12 630～14 840千米之间）。

[8]有意思的是，月亮的存在对于上述推理具有极大的重要性。事实上，如果没有月亮，人类科学的很多早期探索都会遇到额外的困难。



绘画：张京

3　地心说vs日心说

我们已经知道，天上的日月星辰并不是静止不动的，从它们的东升西落中所能得到的最直接、最直观的结论，就是所有天体都在一个以地球为中心的天球上，围绕地球转动。这种几乎出现在所有早期文明中的猜测是地心说（Geocentrism）的雏形。

但世界的有趣之处就在于，它常常给你一点希望，似乎一个简单图像就能让你抓住点什么，但稍稍细究一下会发现事情并不那么妥帖。拿日月星辰的运动来说，星星的运动倒是的确能用一个天球的转动来描述——因为它们只有周日运动，但太阳、月亮及五大行星却除了周日运动外还各有各的“私活”：太阳有周年运动，月亮有月相变化，五大行星更不像话，不仅各有各的周期，甚至还每隔一段时间就“倒行逆施”（逆行）一番。区区一个天球是无论如何也摆不平那么多运动的。怎么办呢？古人们想到了一招，那就是把天球当成礼物派发，让太阳、月亮及五大行星各占一个，乖乖听话的其他星星们则共享一个。[1]

但这还不够，因为行星的逆行还无法解释。有人也许会说，那有什么难的？让天球一会儿正转，一会儿逆转不就行了？打住！万万不行。要知道，从古希腊开始直到17世纪之前，在差不多两千年的时间里，人们对天体运动的描述一直遵守着两个要素：一是天球必须为球形，二是它的运动必须有某种类型的均匀性。这几乎是当时对“解释”一词的定义，非如此不能算是解释。让天球像眼珠子那样乱转是万万不行的——文雅点说是不完美的。

天球必须完美，行星却要倒行逆施，这就让人伤脑筋了。在被伤了

脑筋的人当中就有古希腊先贤柏拉图（Plato，公元前428（427）—前348（347）？），他给后人留了一道思考题：如何用均匀有序的运动来描述看起来不规则的行星运动？

要说历史上的聪明人还真不少，柏拉图的思考题一出，很快就有人按下了抢答键。抢答者不是外人，而是柏拉图的学生欧多克斯（Eudoxus，公元前400（408）—前355（347））。他的答案很豪爽，那就是派发更多的天球，让每个行星都被几个同心天球共同带动，直到满意为止。这个答案的妙处在于可以让那些同心天球的转轴及快慢彼此不同，但却各自保持均匀（从而仍然是完美的）。在欧多克斯的模型中一共用到了27个天球，用这种方法，他对包括行星逆行在内的很多天体运动现象给予了粗略描述。为了表彰他的贡献，我们授予他一个荣誉称号：第一位试图对行星运动做出数学描述的先贤。

但欧多克斯的模型无法经受住哪怕只是稍微细致一点的观测考验，而且人们早就发现行星的亮度并不是恒定的，在当时这意味着它们与地球的距离不是恒定的，这显然不是欧多克斯的同心天球模型所能解释的。怎么办呢？另一位古希腊先贤，以研究圆锥曲线著称的阿波罗尼斯（Apollonius，公元前262—前190）支了一个妙招。阿波罗尼斯提出太阳、月亮及五大行星各自绕一个所谓的本轮（epicycle）作匀速圆周运动，而本轮的中心则绕一个以地球为中心的所谓均轮（deferent）作匀速圆周运动。用这种方式，他不仅可以让行星与地球的距离发生变化，而且同样可以——并且能更好地——解释行星的逆行。不过在他的模型中出现了不以地球为中心的东西——本轮，这对最刻板的地心说模型是一种偏离。这种偏离是在纯粹观念与观测现实之间小心翼翼的妥协，它看似细微，却是一种实证精神的萌芽。

阿波罗尼斯的这种均轮加本轮的构想成为了地心说模型的新框架。

为了拟合越来越精密的观测，地心说模型变得越来越“轮”丁兴旺。但不幸的是，人们很快就发现，轮多不一定力量大，有一些细微现象，比如行星的逆行幅度时大时小，似乎无法靠简单地增添轮子来解释。怎么办呢？地心说模型的集大成者，古希腊天文学家托勒密（Ptolemy，90—168）决定下猛药，让纯粹观念再次向观测现实作出妥协——而且是重大妥协。托勒密一举放弃了均轮的中心为地球，以及均轮的转动为匀速这两大几乎被视为底线的观念，引进了所谓偏心等距点（equant point）的概念，对诸如行星逆行幅度时大时小之类的现象作出了一定程度的解释。[2]



古希腊天文学家托勒密（90—168）

但这还不够，因为除上述现象外，行星运动还有一个引人注目之

处，那就是水星和金星的运动总是局限在太阳左右一个小范围之内，而不像其他行星那样满世界乱跑。为了解释这一现象，这两颗行星的本轮中心被假定为永远处在地球与太阳的连线上。把这些修正汇集到一起，托勒密的地心说模型（彩图3）就基本完成了，剩下的只是微调。

后人对托勒密这个与地心说联系在一起的名字往往有一种模糊的错觉，以为那是某种保守理论的代言人。事实上，托勒密是一位真正伟大的天文学家，他的伟大不仅体现在他自己的时代，甚至还向后延伸了一千多年。在那个重理念轻实践的时代里，他明确提出理论必须拟合观测。他的地心说模型就是这种努力的典范，其精度之高，甚至连一千四百年后的日心说模型也无法轻易超越。当代科学史学家霍尔顿（Gerald Holton，1922— ）曾有过这样一句感慨："没有什么事情比低估古希腊人的观点更容易和更错误。"我有同感。当我们挟两千年的历史优势来回顾某些古希腊先贤的思想时，理所当然地会看到大量的错误，甚至可以不夸张地说，他们写得越多，就错得越多（相比之下，像"道可道，非常道"那样东方式的言简意赅实在是太有才了）。但那些错误就像孩子学步时的摔跤，没有它们，人类恐怕直到今天还在爬。

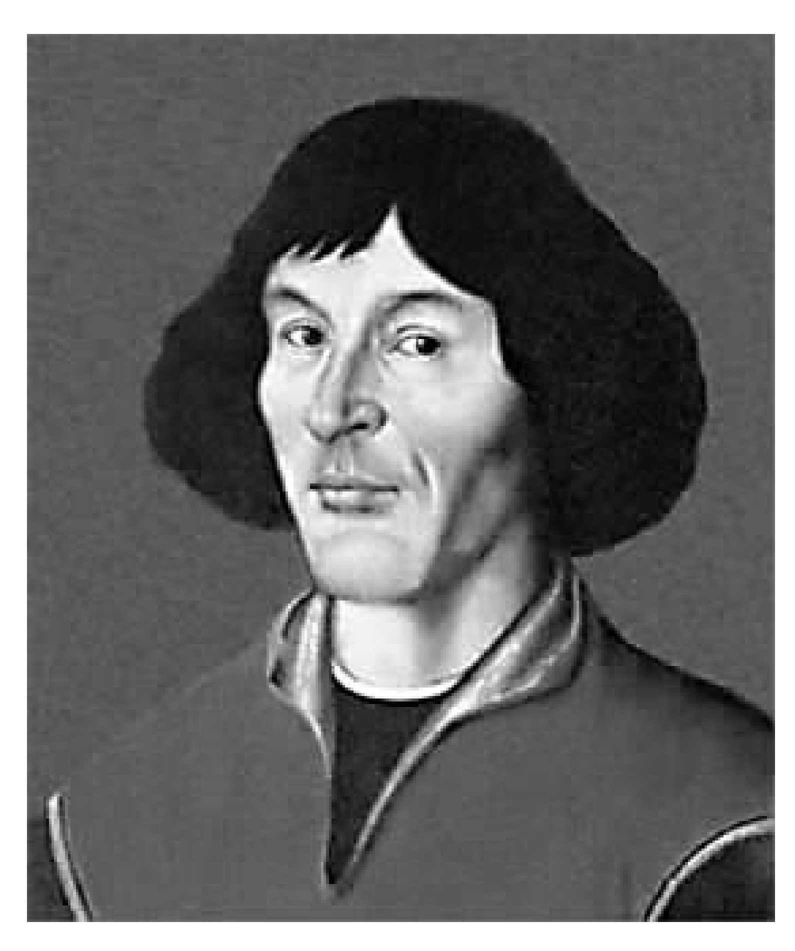
在接下来一千多年的时间里，地心说模型作为天体运动的主流模型，成为了导航、测绘、及星图计算的基础。不过，在这一模型的发展过程中，如上所述，实证精神已开始萌发。随着偏心等距点等概念的提出，诸如天球以地球为中心以及天球必须作均匀圆周运动那样的古老信念已被显著削弱。而且地心说虽然解释了不少现象，带来的问题却也不少。对那些问题的探究使一些人进行了不同的尝试，其中最早的努力甚至在托勒密之前就出现了。

我们在上一章的注释中提到过，古希腊先贤阿里斯塔克斯（Aristarchus，公元前310—前230）曾经用我们介绍过的方法估计过太

阳的直径，结果约为地球直径的7倍（相应的体积约为地球体积的343倍）。虽然与现代值相差很远，但太阳比地球更大这一定性结果还是给了阿里斯塔克斯很大的启示。要知道，地心说的产生在很大程度上乃是出自直觉，而这直觉有两个来源，一个是天体的周日运动，另一个则是天体看上去都很小——小东西围绕大东西转似乎是天经地义的。但如果太阳比地球更大，这直觉就成问题了。一个庞大的太阳有什么理由要绕一个体积不到自己1/300的小不点儿转呢？一般认为，正是这个怀疑使阿里斯塔克斯提出了太阳才是宇宙中心的观点，这是最早的日心说（Heliocentrism）。[3]

但阿里斯塔克斯的日心说并未引起什么反响，因为它面临很多棘手的问题，比方说如果地球在运动，那天上的云彩为什么不会被运动的地球所抛离？这个问题别说阿里斯塔克斯，就连一千八百年后的哥白尼（Nicolans Copernicus，1473—1543）也难以回答。另一个问题比较有意思，那就是如果地球在运动，那么星星的位置应该会像用三角测距法测距时那样显示出视差（因为观测点随地球运动而变化），但实际上我们却从未发现过那样的视差，这是为什么？对于这个问题，阿里斯塔克斯作出了很正确的回答（可惜没人相信），那就是星星离我们实在太远，以至于视差小到了无法被察觉的程度。他的这个回答本身就是一个了不起的天文发现，因为它给当时尚无人知晓的宇宙大小设置了下限，即宇宙起码要大到能让星星的视差不被肉眼所察觉的程度。第三个问题来自所谓“天贵地贱”的观念，当时的很多人相信天上的星星是永恒而完美的，地上的一切则是腐朽而卑微的，两者无论在外观还是质料上都截然不同。[4]而日心说却要让腐朽卑微的地球混迹于永恒完美的行星行列，这怎么可以呢？这个问题在今天看来很无厘头，但在当时却是难以抗拒的“主流民意”。

虽然阿里斯塔克斯的日心说未能掀起波澜，但地心说的麻烦却并未结束。除了太阳比地球大所导致的困扰外，地心说还有其他一些不如人意之处。比方说行星和太阳在地心说中是有相似地位的，但行星的本轮周期却全都是一年，即恰好等于太阳绕地球运动的周期，这种巧合在地心说中是很难解释的。此外，随着航海业的兴起及对日历与定位精度的要求日益提高，地心说的精度也越来越成问题了。正是在这种背景下，1543年，一本全面阐述日心说的著作——《天体运行论》（*On the Revolutions of the Heavenly Spheres*）问世了。这是一部“难产”的著作，它的作者——波兰天文学家哥白尼——用了长达23年的时间来撰写它，完成之后又因担心触怒教会（同时也为了进行细节完善）而延迟了13年，直到去世前不久才发表。



波兰天文学家哥白尼（1473—1543）

哥白尼的这部著作是自托勒密以来最杰出的天文学著作，哥白尼虽然不是最早提出日心说的人，却是最早将日心说由一个观念性学说转变为具有预言能力的定量模型的人。[5]在哥白尼的日心说模型中，我们这个系列的主角——太阳——荣升为了宇宙的中心，我们脚下的地球则变成了行星，一边自转，一边和其他行星一样围绕太阳公转（图3.1）。地心说无法解释的行星本轮周期全都是一年的巧合在日心说中变得显而易见，因为那不过是地球公转产生的表观现象。天体的周日运动也有了很简单的解释，即那不过是地球自转产生的表观现象。不过哥白尼的日心说模型在最低阶近似上虽比同等近似的地心说模型高明得多（因为无需引进本轮），但由于和地心说模型一样未能摆脱圆周运动这一束缚（在这方面哥白尼甚至比托勒密更保守，连偏心等距点那样的概念都不曾引进），从而一涉及细微之处，就无论以繁简程度还是精度而论，都无法真正超越托勒密的地心说模型，这一点直到17世纪初德国天文学家开普勒（Johannes Kepler，1571—1630）发现椭圆轨道后才得以改变。

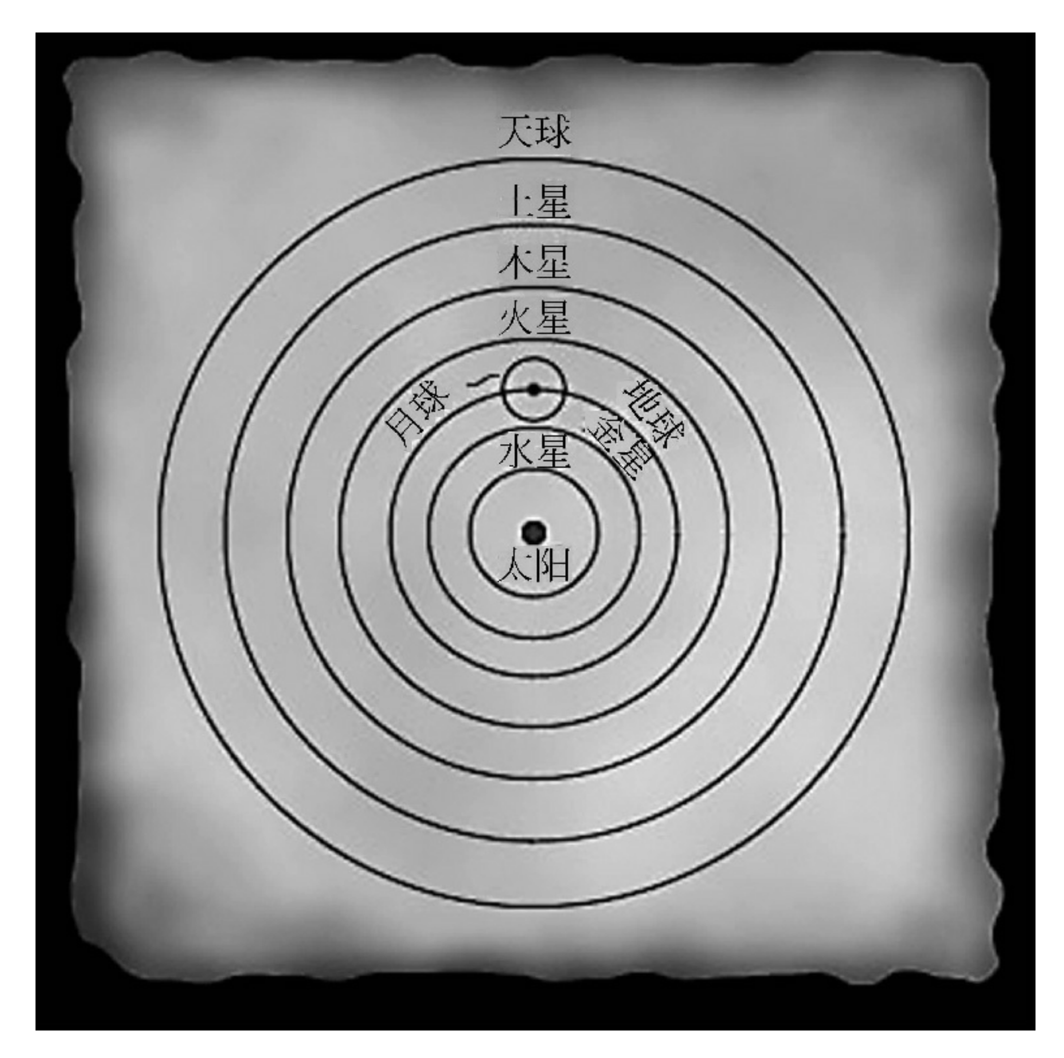


图3.1　简化版的日心说模型

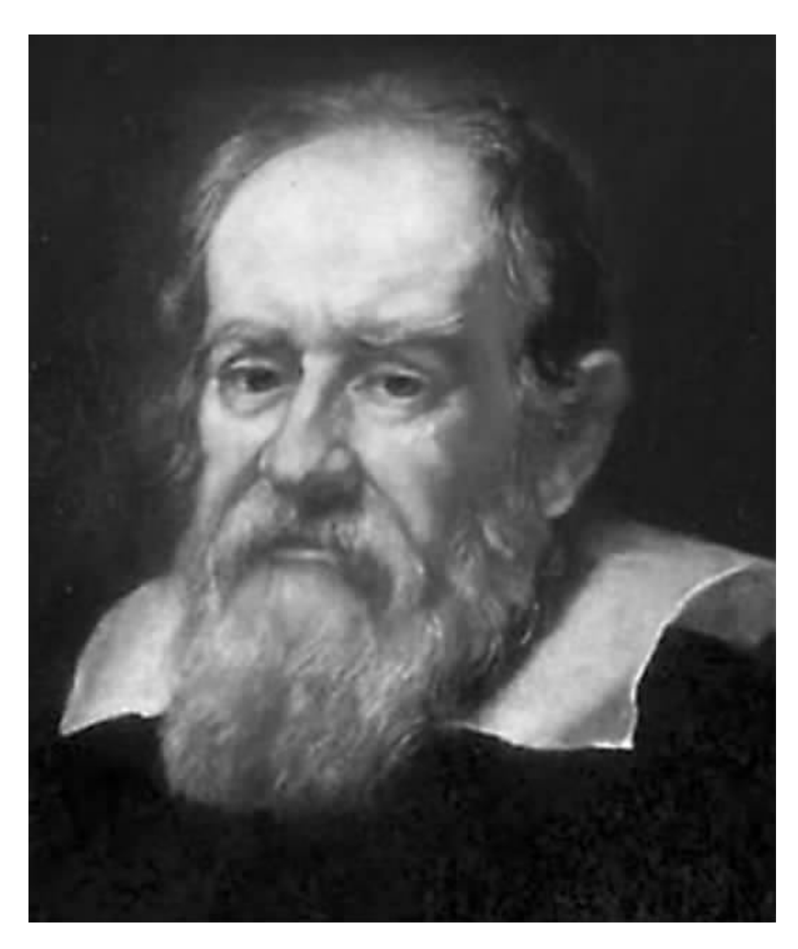
我们刚才提到，哥白尼曾经担心自己的日心说会触怒教会。这种担心并非杞人忧天，因为《圣经》中有不止一处提到太阳运动而地球静止，日心说与那些文字是有冲突的。不过具有讽刺意味的是，哥白尼时代的教会虽竭力维护托勒密的地心说，仿佛后者是天经地义的真理，但实际上，无论托勒密的地心说，还是资格更老的亚里士多德（Aristotle，公元前384—前322）的著作，都并非一直就是教会的宠儿。相反，它们都曾经上过教会的黑名单——一度被教会所禁止。因为那些著作的逻辑与实证色彩和教会所希望的盲从与盲信背道而驰，而且它们在文字上虽对上帝充满了虔敬，其所宣扬的世界体系却基本无需上

帝的帮助，把上帝这个“活雷锋”架空了。不过在13世纪中期，教会采取了新的策略，对一些有影响力的自然哲学著作进行“无菌处理”，使之与圣经接轨。这样做既减少了对手，又充实了自己的理论阵地，可谓一举两得。[6]在哥白尼时代受教会维护的托勒密地心说就是这种经过“无菌处理”后具有教会特色的自然哲学。而哥白尼要推出一种“带菌”的学说，心中自然不无忐忑。

不过忐忑归忐忑，哥白尼与教会的关系其实还是蛮“和谐”的，因为他的正业其实是神职人员（因此有人戏称哥白尼白天是神父，晚上才是天文学家），他甚至把自己的《天体运行论》献给当时的教宗保罗三世（Pope Paul Ⅲ，1468—1549）。而《天体运行论》的出版者奥希亚德（Andreas Osiander，1498—1552）更是为该书包上了一层精心制备的“糖衣”——序言，谦虚地宣称日心说仅仅是一个便于计算的假设，不一定是真实的。经过这样“瞒天过海”的包装，《天体运行论》这一“糖衣炮弹”的发表并未受到教会的干预。直到几十年后意大利科学巨匠伽利略（Galileo Galilei，1564—1642）支持日心说的著作引起强烈反响后，教会才意识到自己被忽悠了。

伽利略的工作为日心说的胜出提供了强有力的支持。我们前面提到过，在地心说模型中水星和金星的本轮中心被固定在地球与太阳的连线上（图3.1），按照那种模型，相对于地球来说，太阳永远只能从后方或侧后方照射水星和金星，由此导致的结果是这两者永远只能有弯钩状的相（感兴趣的读者请自行证明这一点）。但伽利略却通过望远镜发现金星具有类似“满月”那样的相，从而对地心说构成了判决性的打击。[7]另一方面，在所有针对日心说的反对意见中，除宗教因素外，最棘手的问题是运动地球上的东西为什么不会被地球所抛离？这个问题难倒了从阿里斯塔克斯到哥白尼的所有人，却被伽利略提出的相对性原理所回

答。甚至连“天贵地贱”那样的“主流民意”，也因伽利略发现太阳黑子而遭到了驳斥。



意大利科学巨匠伽利略（1564—1642）

1632年，伽利略发表了名著《关于两大世界体系的对话》（*Dialogue Concerning the Two Chief World Systems*，简称《对话》），对地心说和日心说这两大世界体系进行了看似不偏不倚，实则显著青睐后者的阐述，而且在阐述中还对已被教会认可的亚里士多德的很多观点提出了异议。这一切令教会很生气，后果很严重。其实，伽利略倒也并非吃了熊心豹子胆，他在1616年曾受到过教会的“警告处分”，在那之后安静过几年。这回之所以敢“顶风作案”，是因为他的一位大主教朋友于1623年成为了教宗厄本八世（Pope Urban Ⅷ，1568-1644）。这么过硬

的上层关系给了伽利略一种安全感，使他以为“科学的春天”到来了。

他完全错判了形势。

实际情况是：《对话》发表后才不过一年，1633年，罗马宗教裁判所就对伽利略进行了审判，并裁定他有罪。低头认罪还是顽抗到底？这是一个问题。年近古稀的伽利略选择了前者，他在认罪书中表示：“我，伽利略，……手按圣经起誓，我过去和现在一直相信，在主的帮助下今后也将相信圣天主教和使徒教会所持有、传授及教导的一切。”对于日心说，他表示：“我发誓今后绝不以口头或书面形式发表任何类似的东西。”

但教会的干预最终未能阻止科学在经历了中世纪黑暗后的快速复兴。日心说先是作为一种纯粹的计算工具（如《天体运行论》的序言所谦称的那样），而后作为一种具有真理性的理论还是逐渐流行了起来。1832年，苏格兰天文学家亨德森（Thomas Henderson，1798—1844）发现了半人马座α星（α Centauri）的视差，[8]从而直接证实了阿里斯塔克斯的先见之明，同时也扫清了日心说的最后一个技术障碍。

在无可逆转的局势面前，教会的态度也终于有了变化。1992年10月，教宗约翰·保罗二世（Pope John Paul Ⅱ，1920—2005）向伽利略在引进实验方法及理解日心说方面所做的巨大贡献表示了敬意和感谢，并承认教会对地心说的维护乃是对《圣经》作字面解读导致的错误。2000年3月，约翰·保罗二世签署正式声明，承认当年对伽利略的审判是错误的，并为教会两千年来所犯的暴力、迫害及错误道歉。2008年3月，梵蒂冈教廷为伽利略建造了雕像——离那雕像的矗立之处不远，便是375年前伽利略等待审判的地方。

“无可奈何花落去，似曾相识燕归来”，历史走过了一个漫长而沉重的轮回。

日心说与地心说的争论虽然以日心说的胜出而落幕，但日心说将太阳视为宇宙中心的做法却很快也受到了质疑。事实上，太阳与星星的差别不就是前者看上去像一个圆盘而后者像一群小点吗？既然日心说已经把我们脚下这个看起来比太阳还大的地球与那五个看上去像小点的行星归入了同一类别，太阳为什么就不能和星星一样呢？

思想的禁忌一旦被打破，新的想法就会源源而生。1584年，意大利哲学家布鲁诺（Giordano Bruno，1548—1600）提出了太阳只是无限宇宙里的无数颗星星之一的想法。[9]1644年，法国数学家笛卡儿（René Descartes，1596—1650）也提出了太阳和其他星星一样的观点（虽然他有关太阳和星星的具体模型——旋涡模型——是完全错误的）。今天我们知道，太阳只是太阳系的中心，而不是宇宙的中心。太阳是银河系上千亿颗恒星中很普通的一员，而银河系又只是可观测宇宙上千亿个星系中很普通的一员。

这就是太阳的真正身份——一颗非常普通的恒星，可观测宇宙中发光星体的一百万亿亿分之一。

但无论多么普通，太阳对于人类来说都是独一无二的。它是光和热的源泉，也是唯一一颗能让我们看到圆面的恒星。它与我们的关系是如此密切，在任何一个晴朗的白天，它那光芒夺目的圆面哪怕只出现些许的破缺，或几分钟的消失，都是非同小可的事情。在下一章里，我们将一同去欣赏这种被称为日食的现象。

---

[1]顺便说一下，从那时起直到中世纪，太阳和月亮是被很多人视为行星的（因此那时的行星实际上有7颗，太阳和月亮都曾拥有一个名字叫行星），我们为了避免混淆才将它们单独列出。

[2]托勒密的偏心等距点概念是对他所放弃的以地球为均轮中心，以及均轮的转动必须均匀这两大观念的补偿。在他的模型中，地球虽不再处于均轮的中心，但和一个被称为偏心等距点的位置对称分布在均轮中心的两侧，均轮转动的角速度相对于球心和地球虽不再均匀，但相对于偏心等距点却是均匀的。这个模型可以说是天球体系中最接近椭圆轨道的构想（偏心等距点的作用接近于椭圆的焦点）。

[3]阿里斯塔克斯是最早提出地球绕太阳运动的人，但在他之前就有人提出过地球运动的想法，比如毕达哥拉斯学派的古希腊先贤菲洛劳斯（Philolaus，公元前470—前385）曾提出过包括地球、太阳在内的所有天体都围绕一个所谓的“中央火”（central fire）转动的观点。

[4]细心的读者也许会问：我们用肉眼就能看到月亮上的阴影，这岂不是与天体的完美相矛盾？Good question！古希腊人对此的解释是月亮离地球太近，从而被“污染”了（近墨者黑嘛）。有人可能还会进一步问：为什么要让一大批永恒完美的天体围绕一个腐朽卑微的地球转呢？这不是把鲜花插在牛粪上吗？这个大逆不道的问题就得问上帝了，据说是它把人类造在地球上，并让天体围绕地球转的。

[5]在从阿里斯塔克斯到哥白尼的一千八百年间，有一些其他人也提出过背离地心说或接近日心说的理论，但都没有定量化，且大都因不符合“主流民意”而自行或被迫放弃了。

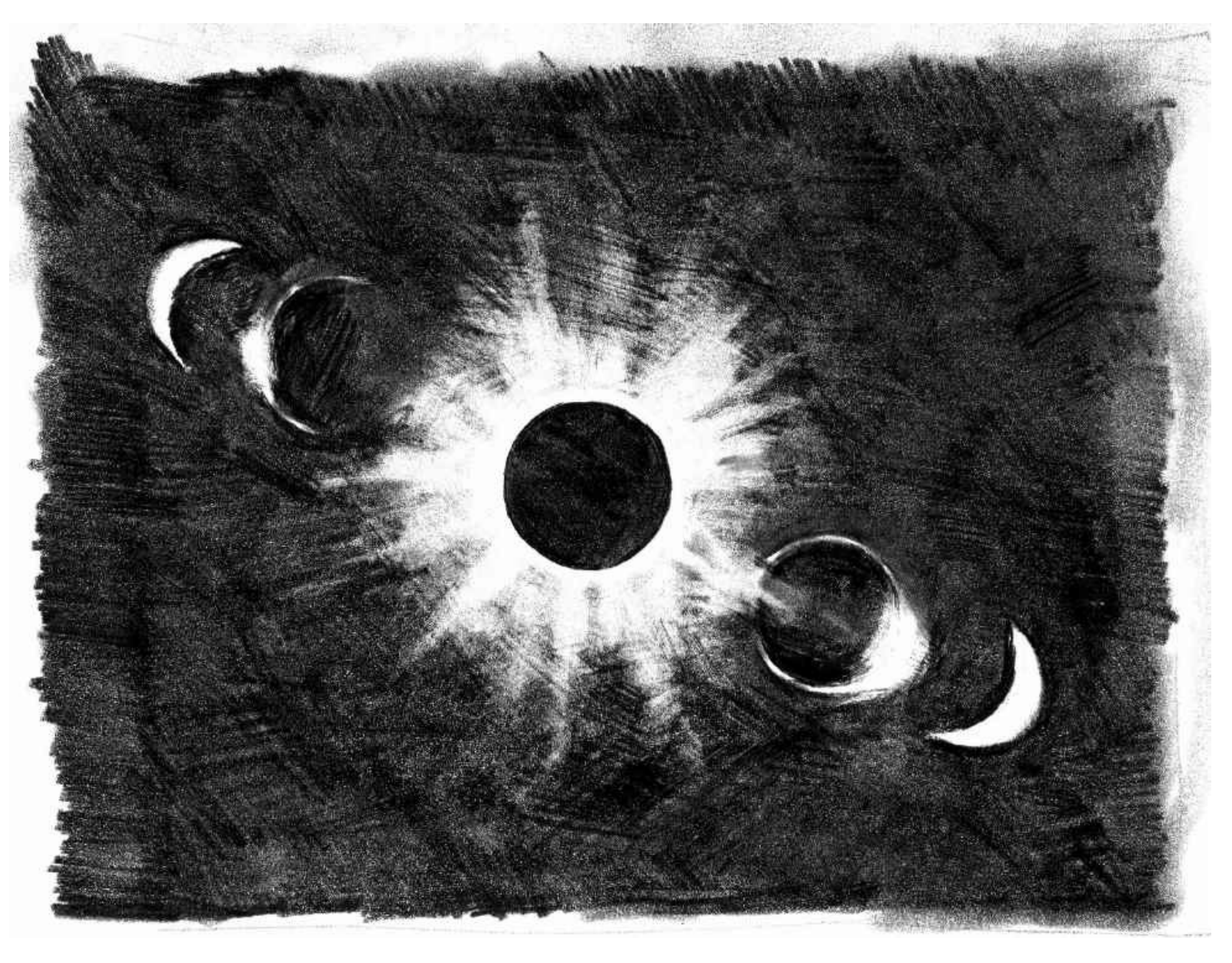
[6]在这一过程中为教会立下汗马功劳的是所谓的经院哲学家

（scholastic philosopher），其代表人物是被教会封为“天使圣师”的阿奎纳斯（Thomas Aquinas，1225—1274）。经院哲学家以宗教教义为指导，通过对古典哲学思想进行包装、诠释及歪曲、诡辩，而构建出与圣经相协调的新体系。

[7]在日心说模型中，金星的“满月”相出现在它与地球分处于太阳两侧的情形下，这时金星离地球的距离最大，从而部分抵消了“满月”相的亮度优势，因此金星的亮度变化远小于单纯由距离变化所预期的，这一点曾被认为是日心说的一个难题。

[8]不过亨德森对自己的观测缺乏信心，直到1839年1月才发表，在发表时间上落后于德国天文学家贝塞尔（Friedrich Bessel，1784—1846），后者于1838年发现了天鹅座61星（61 Cygni）的视差。

[9]布鲁诺因为这一信念及其他若干罪名被罗马宗教裁判所起诉，并最终判处火刑，于1600年2月17日处决。



绘画：张京

4　日食——既寻常又稀有的奇观

美国科幻作家阿西莫夫（Isaac　Asimov，1920—1992）曾经写过一个著名的科幻故事，叫做《黄昏》（*Night　fall*）。在这个被许多读者推举为有史以来最优秀科幻作品之一的名篇中，阿西莫夫虚构了一个由六个太阳组成的多星系统，在那里的一个有“人”栖居的行星上，几乎任何时候都至少有一个太阳悬在空中，夜幕每隔2049年才会降临一次。每当那一时刻来临，地平线上硕果仅存的一个太阳会遭遇“日全食”（total eclipse），传说中能夺人魂魄、让人丧失理智，进而毁灭整个文明世界的星星会出现在黑暗天空里。所有人都在短时间内陷入巨大的恐慌和骚乱之中，周而复始地亲手将星星毁灭文明世界的传说变为现实。

我们很幸运，没有生活在那样的多星系统中。[1]只有一个太阳的我们早已习惯了日夜的更替，星星在我们眼里非但不是毁灭文明世界的恐怖象征，反而是一种魅力无穷的美景（从这个意义上讲，它倒也能夺人魂魄）。不过，即便对于我们来说，如果太阳在原本应该出现的时候突然消失，或其圆面出现破缺，依然是一件非同小可的事情。在这种被称为日食（solar eclipse）的自然现象中，最扣人心弦就是阿西莫夫故事中提到的日全食。如彩图4所示，当太阳即将被全部遮盖时，月球的巨大阴影自西向东掠过地面[2]，夜幕骤然降临，星星重新闪耀，有时还能看见美轮美奂的贝利珠（Baily's bead）和壮丽的日冕（solar corona）。这时候，有些人将会感到颤栗——不是因为害怕，而是由于气温的骤降。在日全食的短暂过程中，气温会有相当明显的降低（比如1878年7月29日的日全食期间，美国丹佛市的气温从酷热的46°C骤降到28°C）。这种笼罩整个天空和大地的大自然的华丽演出，对亲临者来说往往是令人陶

醉和毕生难忘的。

不过这只是现代。在古代，日食的出现可不是什么轻松的事情（虽然有时也能导致好结果）。古希腊历史学家希罗多德（Herodotus，公元前484—前425）曾经记载过公元前六世纪米底斯（Medians）与利底亚（Lydians）两族交战时，因遭遇日食致使双方惊恐万分、终止干戈的事情。那样的事情在历史上发生过多次，甚至直到20世纪60年代，柬埔寨内阁首相朗诺（Lon Nol，1913—1985）的军队还在一次战斗中因遭遇日全食而惊慌失措。

在对日食成因缺乏了解的古代，人们对日食有过许多荒诞不经的猜测。我们熟悉的“天狗吃太阳”就是其中之一。为了阻止天狗的“暴行”，民众常常敲锣打鼓、鸣金放炮，甚至连九五之尊的皇帝也往往要吃素斋、避正殿，诚惶诚恐。类似于“天狗吃太阳”的传说在其他古文明也有，只是所涉及的猛兽不尽相同，吞吃太阳的原因五花八门而已。最搞笑的或许是印度的一种传说，该传说认为太阳常常向某个野蛮部落的成员借钱，却借而不还。对方一怒之下就会吃掉它（但吃完后又吐出来，看来还是惦记着还钱的事情）。这种猛兽（或猛人）吃太阳的说法并不是古人对日食成因的唯一猜测。比这种“猛兽说”更有情趣的是所谓的“夫妻说”。那种说法也是形形色色，比如在某日耳曼传说中，月亮和太阳是一对不和睦的夫妻，而且太阳是妻子，当月亮偶尔去看望太阳时就会出现日食，但它们和睦不了几分钟就又会闹翻（幸亏如此），于是太阳就会重新出现。当然，也有些传说不那么“诬蔑”太阳和月亮的夫妻关系，比如在北美某印第安部落的传说中，太阳和月亮是恩爱夫妻，日食的成因——猜得到算你有本事——是太阳的手臂上抱着他们的孩子！

这些荒诞不经的传说，以及视日食为恐怖天象的年代对于生活在现代文明社会中的人来说已经很遥远了。对现代人来说，有幸观赏到日

食，非但没什么恐怖，反而是令人羡艳的经历。有些天文爱好者甚至不惜破费，千里迢迢地赶往日食带观赏日食。有些天文学家更是甘当现代“夸父”，乘坐喷气式飞机追逐日食，目的就是让这一天象的持续时间尽可能延长。我们早已知道，日食并不神秘，它只不过是月球偶尔跑到地球与太阳之间，挡住了阳光而已。

明白了这个浅显的道理，我们就可以冒充天文学家来分析一下日食的规律。我们知道，月球每个“月”都会绕地球转一圈。既然是转一圈，那就总会经过太阳的方向。这么推算起来，日食似乎每个月都应该发生一次，每个世纪则应该有1 238次。（请读者想一想，为什么不是1 200次？）但事实上，在已经过去的20世纪中，总共只发生过228次日食。在21世纪中，也将只会有224次日食，只占1 238次的18%左右。

看来天文学家不是那么容易冒充的，我们首先得搞明白：那另外82%的日食哪里去了？

答案是：被地球漏掉了。要解释这一点，我们需要对地球与月球的公转轨道特点有一个简单了解。这其中对日食来说最重要的特点，是地球与月球的公转轨道并不在同一平面上，而是有一个平均为5.14°的夹角。由于这个夹角的存在，即使月球位于地球和太阳之间，它相对于地球公转轨道平面来说，也往往不是偏上，就是偏下，它的影子多数时候只能投射在清冷的虚空之中，而无法触及地球，从而无法形成日食（图4.1中左、右两侧的情形就是如此）。[3]

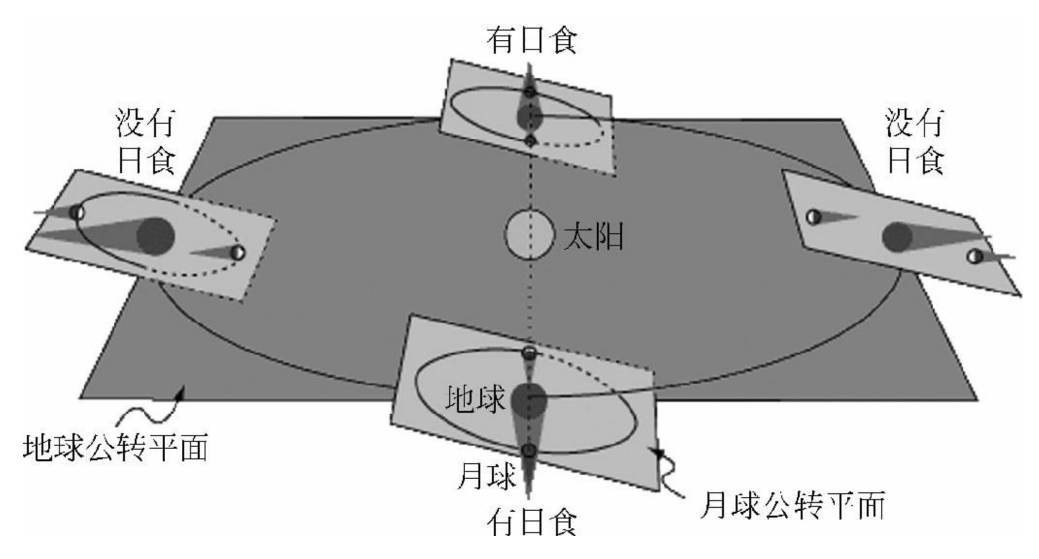


图4.1　地球、月球的公转轨道与日食

那么什么时候才会有日食呢？显然只有当月球不仅位于地球和太阳之间，而且还恰好离地球公转轨道平面不远时。由于整个月球公转轨道（作为一个椭圆）与地球公转轨道平面的交点只有两个，因此月球只有运动到地球和太阳之间，并且又恰好在这两个交点之一的附近时，才能形成日食。在天文学上，这两个交点有自己的名字，视月球自南向北还是自北向南穿越地球公转平面而定，分别被称为升交点（ascending node）和降交点（descending node），两者的连线则被称为交点线（line of　nodes）。用这种术语，形成日食的条件也可以表述为：月球运动到地球和太阳之间，并且交点线与太阳方向几乎重合（这保证了月球在两个交点之一的附近）。从图4.1中不难看到，交点线与太阳方向几乎重合的情形在整个地球公转周期上只会出现在两个时段里（即图4.1中两个“有日食”的位置附近），因此日食的发生并非每月一次，而似乎是每年只有两次。

如果每年有两次日食的话，一个世纪就是200次。这与前面提到的次数接近了不少，但仍有偏差，可见在日食的频率中还隐藏了别的玄机。这玄机之一就在于月球的公转轨道并不是固定不变的。主要受来自

太阳的引力摄动影响，月球的公转轨道平面在不断改变着方位，由此导致的结果是交点线会缓慢转动，这种转动的方向与地球公转的方向相反，周期约为18.61年，称为交点的退行（regression of nodes）。如果不存在交点的退行，交点线将每隔半年与太阳方向重合一次，日食将会有规律地出现在每年年历的固定时段中，它在历史上的神秘感也将褪去不少。但由于存在交点的退行，日食的出现时间就变得有些扑朔迷离了。因为交点线离开太阳方向后，无需经过半年，就会由于自己的转动而提前与太阳方向再次重合。简单的计算表明，这之间的间隔只有173.3天（读者可以利用交点线的转动周期为18.61年这一信息自行计算一下）。两次这样的间隔则是346.6天，这称为交点年或食年（eclipse year）。这个时间单位在分析日食时有着重要作用。

由于每个食年都包含了交点线与太阳方向的两次重合，而“食年”的长度（346.6天）只有“年”（365.24天）的95%左右。这么推算起来，每个世纪包含的食年数目约有105个，而日食的次数则应该有210次左右。这比前面的200次又进了一步，但仍比实际次数来得少。这又是怎么回事呢？这次的答案更加微妙，但关键之处其实已蕴涵在了前文的措辞之中。我们在前面提到，日食发生的条件是月球运动到地球和太阳之间，并且又恰好在两个交点之一的附近。这里的“附近”二字十分关键。为什么是“附近”而不必正好在交点上呢？一个主要的原因是地球是一个庞然大物。这就好比用一只很大的箩筐去兜别人扔过来的东西，东西哪怕扔歪一点，也照样能兜到。日食的形成也一样，由于地球很大，月球即使偏离交点，只要偏得不太过分，影子就仍能投射到地球上，从而仍能形成日食。那么，多大的偏离才不过分呢？计算表明，只要偏离在15.35°以内，就能确保日食；如果偏离在9.92°之内，则不仅能确保日食，而且还能确保日全食；甚至当偏离在15.35°～18.52°之内时，仍有一定的可能性会发生日食（这时是否发生日食将取决于月球及太阳离地球的远近

等其他因素），这个允许偏离的最大范围所对应的时段被称为食季（elipse season）。

由于偏离可以发生在交点的任何一侧，因此食季的角度范围是18.52°的两倍，即37°左右。在地球绕太阳的公转中，走过这样一个角度范围所需的时间约为37天，这就是食季的长度。由于这个长度比一个“月”来得长，因此在一个食季中，至少会发生一次日食。运气好的话，月球有可能会两次经过能形成日食的位置，这样我们就能在一个食季中看到两次日食。比如2011年的6月1日和7月1日这两个同属一个食季的日子就都出现了日偏食（可惜中国不在那两次日偏食的日食带上）。由于在一个食季中有一定的可能性出现两次日食，因此每个世纪的日食次数要比食季本身的数量略多，而且各个世纪的日食次数不尽相同。

现在让我们来介绍一些更精确的日食规律。我们已经知道，日食的发生是因为月球遮挡了太阳。很明显，这时的月相必定是新月（因为太阳在月球的正后方）。因此，日食发生的粗略条件虽然取决于食年和食季，确切日期却是由新月决定的（读者如果想要推算日食的时间，这一点是很重要的）。[4]在太阳、地球和月球这一系统中，非常巧合的是：19个食年几乎恰好等于223个朔望月——两者都很接近6 585天。这说明与任何一次日食相隔6 585天，就几乎铁定会有另外一次日食。更巧合的是，月球每两次经过近地点（或远地点）的时间间隔——即所谓的近点月（anomalistic month）——为27.554 55天，[5]239个近点月也几乎恰好就是6 585天。由于近点月描述的是月地距离——从而也是月球的角直径——的变化周期，而月球的角直径是影响日食种类及持续时间的重要因素（因为月球的角直径越大，就越容易形成日全食，而且能遮挡太阳的时间也就越长）。因此6 585天是食年、朔望月和近点月的共同倍数这一巧合，意味着每隔6 585天，与日食有关的太阳、地球和月球的

各种位置参数都几乎恰好彼此相同，由此导致的结果是出现两次几乎一模一样的日食！6 585天这个周期由于这一特点而变得很奇妙，它有一个专门的名称，叫做沙罗周期（Saros），这个名称来自古巴比伦，它的希腊文含义是“重复”。古巴比伦人早在两千五百多年前就知道了这一周期。由于日食的确切日期取决于新月，而新月之间的间隔是朔望月，因此沙罗周期的确切长度由223个朔望月所确定，比较精确的数值是6 585.32天，或18年零11天又8小时。[6]

作为应用沙罗周期的例子，我们可以看一看2009年7月22日经过中国长江流域的，被称为“最壮观日食”的日全食，那次日食的全食时间长达6分39秒，属于超长日全食。与它以沙罗周期相间隔的前三次日食分别发生在1955年6月20日，1973年6月30日和1991年7月11日，也都是日全食，全食时间分别为7分8秒，7分4秒和6分53秒，与当前天文条件下日全食持续时间的理论上限7分31秒（请读者想一想，这一理论上限在什么条件下可以实现）相差不多，也都是超长日全食，彼此间非常相似。不仅如此，我们还可以很放心地预言，与那次日食往未来方向间隔一个沙罗周期的2027年8月2日，也一定会发生一次持续时间很长的日全食（瞧瞧，现在咱们也能预言日食了）。

利用沙罗周期的特点，人们对日食进行了归类，将被沙罗周期所分隔的各次两两相似的日食归为同一序列，称为沙罗序列（Saros cycle）。每个沙罗序列有一个序列号，比如2009年7月22日那次日食所属的序列号是136，即沙罗序列136（Saros cycle 136）。那是一个著名的沙罗序列，它之所以著名，除了当前的全食时间特别长以外，还有一个更重要的原因，我们将在本章的末尾予以揭晓。

有关沙罗序列，还有几个重要特点值得一提。细心的读者也许注意

到了，在沙罗周期中，除了18年零11天这个大头外，还有一个8小时的零头。这个零头虽然不大，却不容忽视。由于地球每24小时自转一周，因此这8小时的零头意味着同一个沙罗序列中，相邻的两次日食在经度上大致相差1/3个地球，即120°，比如前面提到的经过中国长江流域的沙罗序列136日食，它的上一次日食发生在中美洲和太平洋上，下一次则将移师非洲北部。同一地点的观察者是无法观察到沙罗序列中的相邻日食的（从这个角度上讲，古巴比伦人能够发现沙罗周期实在是一件很奇怪的事情，感兴趣的读者请想一想，或查查资料，探究一下他们是如何发现沙罗周期的）。有关沙罗周期的另一个重要特点是它具有一定的寿命，而不能千秋万载。这是因为虽然19个食年的长度非常接近223个朔望月，但毕竟不是完全相等。仔细的计算表明，前者比后者长了0.46天。由此导致的后果，是经过一个沙罗周期后，月球相对于升交点或降交点的位置将会偏离0.48°。我们在前面说过，日食食季的角度范围约为37°，因此经过不到80个沙罗周期，月球位置的总偏移就会超过食季的角度范围，这意味着沙罗序列的终结，这个过程的总时间约为1 300多年。因此沙罗周期是不能千秋万载的——确切地说是只能千秋，不能万载。

日食的发生还有其他一些规律，限于篇幅，我们就不介绍了。对日食规律的研究不仅能让天文学家们预言未来日食出现的时间、地点及持续时间，而且还能帮助历史学家们还原某些曾经提及过日食的历史事件的准确时间（比如希罗多德所记载的那次因日食而终止的战争就被历史学家们确定为最有可能发生在公元前585年），并且校正古代的历法。对日食规律的推算——如我们在上面所做的——从原理上讲虽然是直截了当的，但要想做得精确却很不容易，需要考虑各种细微引力摄动的影响。以对日食带的推算为例，由于月球阴影在地球表面大部分区域的运动速度高达每秒几百米，几分钟的时间误差就足以造成上百千米的空间

误差。依据这样的预言去追逐日食，就会像革命大片中那些智力低下的敌军一样，完全扑错地方。

在接下来的篇幅中，我们简单介绍一下日食的种类。如图4.2所示，在日食中，如果月球的本影扫过地球，相应的日食就称为日全食，被本影扫过的区域称为全食带；如果本影无法触及地球，但其延长区——即所谓的束后本影（antumbra）——扫过地球，相应的日食就称为日环食（annular eclipse），被束后本影扫过的区域称为环食带；如果本影和束后本影都无法触及地球，而只有半影扫过地球，相应的日食就称为日偏食（partial eclipse），被半影扫过的区域称为偏食带。显然，在日全食发生时，月球的角直径必须大于太阳，而在日环食发生时，月球的角直径必须小于太阳。这两种情形都能发生，是因为我们在第2章中提到过的一个事实：即“在太阳和月球之间存在一个美妙的巧合，那就是它们看起来几乎是一样大的”。这一巧合，加上月球和地球的公转轨道都是椭圆，从而月地和日地距离都会随时间改变这一特点，使得月球的角直径有时候比太阳大，有时候比太阳小。这是我们有时候能看到日全食，有时候能看到日环食的根本原因。

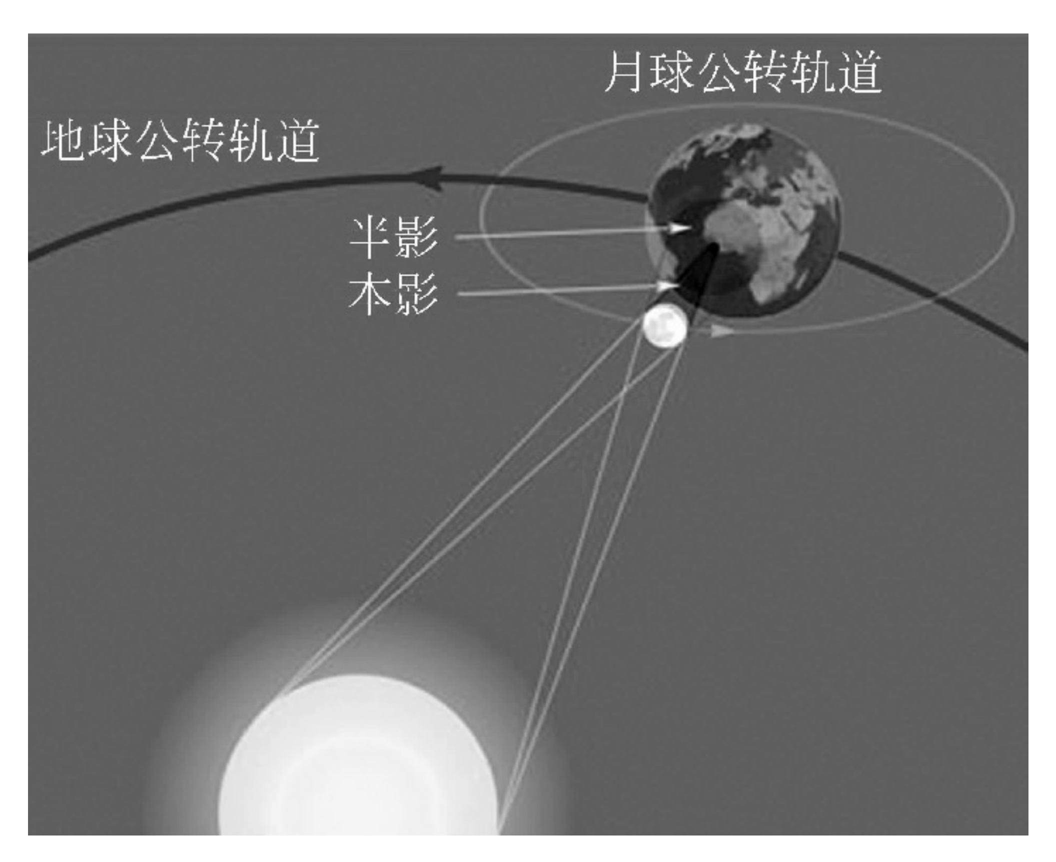


图4.2　日食的图示

由于无论月球的角直径比太阳大还是小，两者终究都很接近，而地球表面又是弧形的，因此偶尔会出现一种更罕见的日食，那就是地球表面的某个区域离月球较近，使得月球看上去比太阳略大，从而形成日全食。而该区域之外的某个其他区域离月球较远，使得月球看上去比太阳略小，从而形成日环食。这种同时具有全食和环食的特殊日食被称为全环食（hybrid eclipse）。在20世纪的224次日食中，日全食、日环食、日偏食和全环食的次数将分别为68、72、77和7次。如此种类繁多的日食出现在同一颗行星上，这不仅在太阳系中是绝无仅有的，甚至在任何其他恒星的周围，其形成概率也是微乎其微的。从这个意义上讲，我们在地球上所能看到的日食是一种极为稀有的天象奇观。事实上，即便对地球来说，这种奇观也不是任何时候都存在的。日食带的狭窄（全食和环食带的最大宽度都只有两三百千米）说明月球与地球的距离只要再大一

点，日全食就将不复存在，只要再小一点，日环食就会烟消云散。而天文学家们早就知道，月球与地球的距离一直都在增加（目前的增加速度为每年38毫米），因此早年的地球上不存在日环食，未来的地球上则不会有日全食。从地质学时标上讲，目前这么丰富多彩的日食格局即使在地球上也是我们这个时代独有的。

在结束本章前，我们还要补充一点，算是对本章标题的注释。我们在本章中虽然只讨论了日食，但前面提到某些概念，比如食季，是同时适用于日食和月食的。食季既是日食的摇篮，也是月食的温床，在一个食季中，月球挡在太阳和地球中间就是日食，地球挡在太阳和月球中间则是月食。那么这两种情形哪一种更容易发生呢？仔细的分析表明，是日食，日食的食季长度要明显大于月食。因此，在地球上所能看到的日食次数要明显多于月食。[7]从这个意义上讲，日食在大范围上虽然很稀有，在如今我们这个小小星球上却很寻常，因此是一种“既寻常又稀有的奇观”。

读到这里，有些读者也许会感到困惑，因为在多数人的印象里，日食远比月食稀罕。之所以会有这种印象，是因为月食发生时，只要天气许可，半个地球上的人都可以看到，而日食发生时，即便老天开眼，也只有一个狭长日食带上的人才有眼福，而且这日食带还常常落入海洋、沙漠、雪山、极地等人烟稀少的地区。因此虽然从总次数上讲日食比月食更多，但除非你不惜跋山涉水去追逐日食，否则你所能看到的日食会明显少于月食。尤其是，假如你特别眷恋家乡，一步都不愿离开的话，也许一辈子都未必能看到一次日食（但依然可以看到几十次月食）。以日全食为例，在地球表面随机选定的地点上，平均每隔410年才能看到一次。[8]

日食——尤其是日全食——不仅是一种美丽的天象奇观，在天文学家们的眼里，更是研究太阳的绝佳机会。对于天文学上的多数研究来说，研究对象的过于暗淡是天文学家们面对的主要困难之一，但对于太阳研究来说，情况恰恰相反，过于明亮才是最大的“麻烦制造者”。太阳的明亮甚至使得天文学家们不敢用精密的哈勃望远镜观察离太阳最近的水星。在这种情况下，日食的存在对于太阳研究有着极大的重要性。这种重要性早在两百多年前就得到了令人瞩目的确立。在1780年10月27日的日全食期间，美国独立战争的交战双方（英、美）为了让哈佛大学的天文学家们能在全食带上进行科学研究，破天荒地作出了停战一天的决定（可惜天文学家们不争气，竟然算错了日食带，以至于功败垂成）。

最后，我们要兑现诺言，来揭晓前面提到过的使2009年7月22日经过中国长江流域的日全食所属的沙罗序列136著名的“更重要的原因”。这个原因很简单：如果我们将2009年7月22日往前推5个沙罗周期，即32927天，我们将得到一个日子1919年5月29日。在那个日子里也发生了一次属于沙罗序列136的日全食，它的持续时间也很长：6分51秒。熟悉物理学史的读者看到这个日期也许已经想起来了，是的，在那一天英国天文学家爱丁顿（Arthur Eddington，1882—1944）对广义相对论中光线的引力偏折效应进行了检验。那次检验也许是日全食期间所有科学研究中最著名的一次，正是它使得沙罗序列136更加出名。

---

[1]在阿西莫夫所设想的这种多星系统中，由于存在极为复杂而且巨大的引力摄动，行星实际上几乎不可能维持周期或准周期轨道，从而几乎不可能为生物进化提供足够稳定的环境。在人们探讨什么样的行星上有可能演化出高等生物时，双星、三星或多星系统中的行星基本上是可以被直接排除在外的。因此阿西莫夫在那篇小说中设想的环境只是一种虚构。

[2]这指的仅仅是普通情形，在某些特殊情形下，月球的阴影不是自西向东掠过地面，而是从空中直接压向地面的。感兴趣的读者可以想一想，在什么情况下月球的阴影会从空中压向地面？另外也请想一想，月球的阴影自西向东掠过地面，与月球的东升西落是否矛盾？

[3]如果地球的直径不是12 700千米，而是90000千米以上，月球的影子（包括本影和半影）就总能投射到地球上。那样的话，日食就真的会大约每个月都出现一次。

[4]作为用新月推算日食确切日期的例子，让我们推算一下2010年1月15日经过中国四川、湖北等地的日环食之后的下一次日食的时间。由于两个食季之间的平均间隔（即食年的一半）是173.3天，很接近6个朔望月（约177天），考虑到食季的长度有37天，而日环食和日全食通常位于食季的中部，因此我们可以预期，2010年1月15日的日环食之后相隔6个朔望月的那一天，即2010年7月11日，会有一次日食。事实上也的确如此，那一天有一次日全食，只可惜它的日食带主要在南太平洋上，只有一小段经过南美洲南端。感兴趣的读者请将2010年1月15日这个日子往回推6个朔望月，您将得到我们在本节中介绍过的另一次日食。

[5]“近点月”与“恒星月”的差别来自于月球近地点（或远地点）的进动，这种进动与月球公转方向相同，周期为8.85年（读者可以据此定量验证一下两者的关系）。

[6]想要验证沙罗周期的读者可以采用以下数据：1食年=346.620 077天，1朔望月=29.530 59天（近点月的数据在正文中已经给出了）。这里要顺便提醒读者的是，如果一个沙罗周期中的18年间恰好有5个而不是4个闰年，则沙罗周期的历法表示将是18年零10天又8小时。

为了行文简洁，后文将不再提醒这一点。另外还有一点要提一下，那就是日食的种类及持续时间与地球到太阳的距离也有关系（不过这个关系比较次要，因为地球公转轨道的椭率远小于月球）。沙罗周期只比18年多10或11天（即0.03年）这一特点，意味着相隔一个沙罗周期后，地球与太阳的相对位置也几乎不变。

[7]早在1887年，奥地利天文学家奥普泽（Theodor von Oppolzer，1841—1886）就对从公元前1208年到公元2161年这3 369年间的所有日食和月食进行了计算，结果是日食约有8 000次，月食只有约5 200次。

[8]更具体地说，北半球的日全食多于南半球。在一个随机选定的北半球地点上平均每隔330年就会有一次日全食，而南半球的这一间隔长达540年。产生这种差异的原因，是因为地球在北半球的夏季里离太阳较远（位于远日点附近），这时太阳的表观直径较小，容易形成日全食。而恰恰是在这段时间里，北半球被太阳照到的范围大于南半球（因为是北半球的夏季），从而在日全食最容易形成的时段里有机会看到更多的日全食。不过北半球并不能永远保有这一优势，由于地球自转轴和地球公转轨道的进动，这一优势将在几千年之后逆转。



绘画：张京

5　插曲：爱丁顿在1919

我们在第4章末尾提到，英国天文学家爱丁顿利用1919年5月29日的日全食，对广义相对论中光线的引力偏折效应进行了检验。在本章中，我们就来聊聊这段或许是日全食期间所有科学研究中最著名的往事，作为太阳故事的插曲。

这段往事既然与验证广义相对论有关，当然得从广义相对论的“始作俑者”爱因斯坦（Albert　Einstein，1879—1955）说起。1907年11月，爱因斯坦正在赶写一篇有关狭义相对论的综述。[1]他一边写，一边思考着一个棘手的问题，那就是如何将狭义相对论推广到非惯性系中。结果有一天，他产生了一个灵感。他在后来访问日本期间所做的一次演讲中回忆了当时的情形，他说当时他正坐在伯尔尼专利局的办公室里，忽然一个念头闪了出来，“如果一个人自由下落，他将不会感觉到自己的体重”。这个念头就是著名的等效原理（equivalence principle）的雏形。按照等效原理，引力场和加速场在小范围内是不可分辨的，由此导致的一个必然结果，是光线会在引力作用下偏折（因为做加速运动的观测者可以让光线看起来是弯曲的）。1911年，爱因斯坦对这种光线的引力偏折效应进行了定量计算，结果发现掠过太阳表面的光线会偏折0.83″（arc second）。[2]

爱因斯坦的这一计算虽然在很多环节上都打着相对论的旗号，其实与相对论并无必然联系，把光当成在牛顿引力场中运动的普通物质也能得到同样的结果。事实上，后来有人从对历史文献的“考古”中发现，早在1808年，德国科学家索德纳（Georg von Soldner，1776—1833）就得

到过同样的结果。甚至比那更早，1784年，著名的英国科学家卡文迪许（Henry Cavendish，1731—1810）就在一篇未发表的手稿中指出过星光在牛顿引力场中会弯曲。当然，爱因斯坦并不知道那些陈年旧账，对他来说，那是等效原理的推论，是一个新的结果。

显然，如果光线在引力场中会偏折，那么当一颗星星出现在太阳近旁时，它的实际方位与表观方位之间就会出现偏差（图5.1）。这个偏差原则上是可以通过比较太阳不在视线附近时星星的方位与太阳在视线附近时星星的表观方位之间的差异来进行测量的。但这里有一个问题，那就是太阳实在太抢眼了，一出场就会使得“六宫粉黛无颜色”——整个天空基本上就看不到星星了，更别说是在它的“卧榻之侧”了。怎么办呢？只有等待机会。等待什么机会呢？等待日全食的机会。因此，爱因斯坦在1911年论文的末尾写道：“由于日全食期间位于太阳附近那部分天空中的星星会变成可见的，理论的这一推论是有可能被观测到的。”他并且呼吁：“非常希望天文学家们能过问此处所提的问题，即使上述考察看起来显得根据不足或冒险行事。”

最早被爱因斯坦的呼吁打动并愿意付诸行动的，是在柏林天文台“打杂”的一位名叫弗洛因德利希（Erwin Freundlich，1885—1964）的德国天文学家。这位曾跟随著名数学家克莱因（Felix Klein，1849—1925）学习数学的年轻人当时正干着一些绘制星表之类“嘴里都快淡出鸟来了”的乏味工作。1911年8月的某一天，事情有了一点转机，他接待了一位来自布拉格（Prague）的物理学家。这种接待工作原本倒也不是什么美差，因为轮得到他去接待的人一般是不重要的。但此次接待的物理学家稍有些不同，他本身虽然不重要，却恰好认得一位有点重要——并且正在变得越来越重要——的人物：爱因斯坦。闲聊中，那位物理学家向弗洛因德利希传达了爱因斯坦1911年的论文精神。弗洛因德利希立

刻就对爱因斯坦的预言产生了兴趣，因为那比他当时正在做的任何事情都更有意思。于是他与爱因斯坦建立了通信联系，讨论如何验证光线的引力偏折。

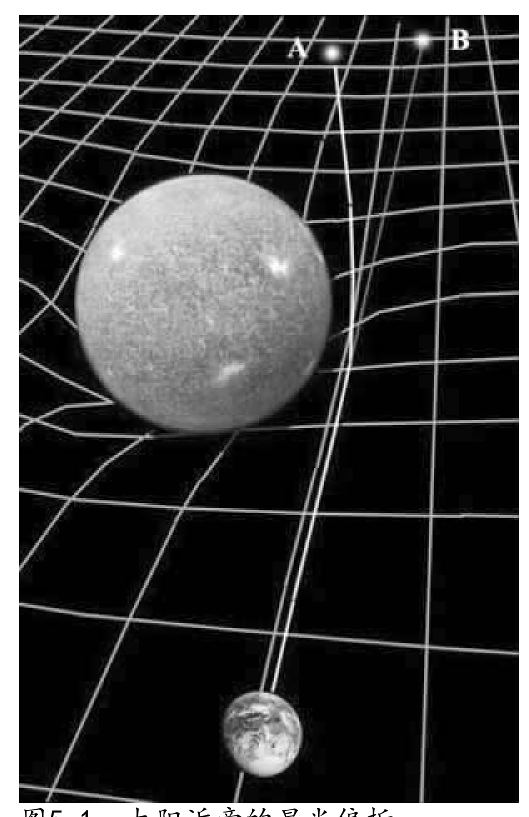


图5.1　太阳近旁的星光偏折

当然，验证的方法爱因斯坦已经说了，是利用日全食。但问题是，日全食的机会不是经常有的，即便有也往往得跋山涉水前往日食带才能观测，这就涉及了钱的问题。那么，有没有不花钱的办法呢？爱因斯坦出了一个点子，他建议弗洛因德利希找一些以前日全食期间拍摄的旧相片，看能否有所发现。弗洛因德利希采纳了这个点子，向世界各地的天文学家索要了一些日全食期间拍摄的旧相片。可惜结果很令人失望，那些相片无一具备验证光线偏折所需的清晰度。

没办法，只能花钱了。

弗洛因德利希把目光瞄准在了1914年8月21日的日全食上。那是一次属于沙罗序列124的日全食，全食时间约为2分14秒，全食带从西亚延伸到北欧，其中离德国较近的观测点在俄国。弗洛因德利希决定多管齐下：一方面与其他天文学家联系，希望届时能分享他们的相片；另一方面自己也筹集了经费，前往俄国亲自进行观测。事情的筹划虽不无困难，但总算是办下来了。但他没有料到的是，随着第一次世界大战的爆发和蔓延，1914年8月1日，德国对俄国宣战了。这一来，已经抵达俄国的弗洛因德利希等人的身份立刻发生了戏剧性的变化，由国际友人变成了敌国奸细。俄国人民的眼睛是雪亮的，很快就把他们这一小撮带着可

疑仪器的德国人扣留了下来。所幸的是，他们后来被作为战俘交换回了德国，但试图验证广义相对论的光线引力偏折效应的努力就此付诸了东流，[3]这是爱丁顿故事之前的主要序曲。

这段序曲中比较微妙的是，在1914年的时候，爱因斯坦虽然正在他的大学同学格罗斯曼（Marcel Grossmann，1878—1936）的帮助下快速推进着广义相对论的研究，他对太阳近旁光线引力偏折角度的预言却仍停留在0.83角秒上，只有正确值的一半。一些注意到这一历史细节的传记或科普作品喜欢就这一点进行发挥，认为假如弗洛因德利希能如愿以偿地拍摄1914年的日全食，爱因斯坦的理论很可能会遭到一次观测的否决。其实就当时的情形来说，这个可能性是很小的。因为一方面，当时的观测误差很大，要在0.83角秒和两倍于此的正确值之间作出无争议的区分是不容易的。另一方面，人们从弗洛因德利希先前对日全食旧相片的处理中发现，他的分析手段存在缺陷，与后来人们普遍使用的手段相比，具有更大的误差。除这两点外，还有一个因素也不容忽视，那就是在光线偏折的正确值尚未出炉的时候，人们并未对如今称为“牛顿值”的这个错误结果与广义相对论的结果进行区分，他们更关心的是光线偏折到底是有还是无。因此只要观测证实偏折存在，哪怕具体数值有一定出入，考虑到误差很大，也依然会被视为对爱因斯坦理论的重大支持。因此，那次观测的流产并不像一些作者所渲染的那样富有戏剧性。

现在回到爱因斯坦这边来。1915年底，爱因斯坦完成了广义相对论，并将太阳近旁光线的引力偏折角度修正为1.7角秒，即原先结果的两倍。此时的爱因斯坦虽远没有后来那样的公众知名度，在学术界却已是重量级人物了。1913年，柏林大学为了把他从苏黎世挖到柏林，不惜派出了像普朗克（Max Planck，1858—1947）和能斯特（Walther Nernst，1864—1941）那样史上最牛的猎头阵容，动用了包括普鲁士科

学院院士在内的超级诱饵，才告得手。

虽然战争还在继续，爱因斯坦所在的柏林几乎成了与世隔绝的孤城，但爱因斯坦在广义相对论上所取得的重大进展，还是很快就通过中立国荷兰的物理学家洛伦兹（Hendrik Lorentz，1853—1928）和艾伦菲斯特（Paul Ehrenfest，1880—1933）传到了一些感兴趣的人那里，其中包括莱顿天文台（Leiden Observatory）的台长德西特（Willem de Sitter，1872—1934）。德西特一直对爱因斯坦的工作怀有浓厚兴趣，是除爱因斯坦本人以外最早研究广义相对论的人之一。为了让英国同行们也能分享爱因斯坦的工作，他将一份爱因斯坦的论文寄给了英国皇家天文学会。而当时任皇家天文学会秘书的不是别人，正是爱丁顿。德西特寄来的论文第一时间就落到了他的手里。

就像把大陆和台湾隔开的不仅仅是台湾海峡，把英国科学界和德国科学界隔开的也并不仅仅是英吉利海峡。两百多年来，这两个国家的科学界之间一直存在着嫌隙（牛顿-莱布尼茨之争留下的恶果），而且当时英国和德国正处于交战状态，情况更是雪上加霜。但爱丁顿却是一个例外，他是一位坚定的和平主义者，丝毫不受英、德两国之间任何争斗的影响，对德国科学家及其工作没有任何成见。爱因斯坦在一篇阐述广义相对论场方程的通信中曾经表示："任何人只要对这一理论有着充分理解，就很少能从它那不可思议的魔法中逃脱出来。"巧得很，爱丁顿恰好就具有使自己"对这一理论有着充分理解"所必需的数学功底，他的命运也就可想而知了。在此后两年多的时间里，爱丁顿被广义相对论那"不可思议的魔法"所彻底吸引，成为了当时为数不多通晓并积极传播广义相对论的物理学家之一。[4]而广义相对论对光线引力偏折的预言自然也引起了他的极大兴趣。



英国天文学家爱丁顿（1882—1944）

1918年，爱丁顿开始与皇家天文学家、格林尼治天文台（Royal Greenwich Observatory）台长戴森（Frank Dyson，1868—1939）商量组织日食远征队，检验广义相对论的光线引力偏折效应的计划。这个计划当时对爱丁顿来说有着双重意义，一方面当然是可以检验让他如此着迷的广义相对论；另一方面，则可以使他摆脱一个现实困境。我们在前面提到，爱丁顿是一位和平主义者，事实上，他的和平主义立场还相当激进，激进到了因拒服兵役而将自己推到牢狱之灾边缘的程度。在这个节骨眼上，检验广义相对论成为了戴森帮他在英国海军部面前开脱的最好理由。[5]

方略既已确定，接下来就是寻找合适的日全食了。我们在第4章中曾经说过，对单一地点来说，日全食的出现是相当稀有的。拿英国来说，当爱丁顿想要检验广义相对论时，英国本土已有近两百年没有发生日全食了（英国本土的上一次日全食发生在1724年），而且未来的短时间内也不会有。爱丁顿如果想在英国本土进行观测，起码得再等上9年，因为英国本土只有到1927年才会有新的日全食，而且持续时间只有24秒，实在是“匆匆，太匆匆”。因此爱丁顿选了一个更近并且更好的时机，这个时机就是我们在第4章末尾提到的发生于1919年5月29日，属于沙罗序列136，持续时间长达6分51秒的超长日全食。那样的日全食对观测来说无疑是极为有利的。而更有利的则是，那时的太阳将位于包含许多亮星的金牛座（Taurus）毕星团（Hyades）。这样的机会哪怕在全世界范围内也不是常有的。那次日全食唯一不利的条件，是全食带远在赤道附近，横贯非洲、大西洋及南美洲，却远离欧洲（图5.2）。在对几个候选地点进行气候分析之后，爱丁顿在非洲和南美洲各选了一个观测点，其中非洲的观测点选在非洲西海岸附近的小岛普林西比（Principe），南美洲的观测点则选在了巴西亚马逊丛林中的小镇索布拉（Sobral）。

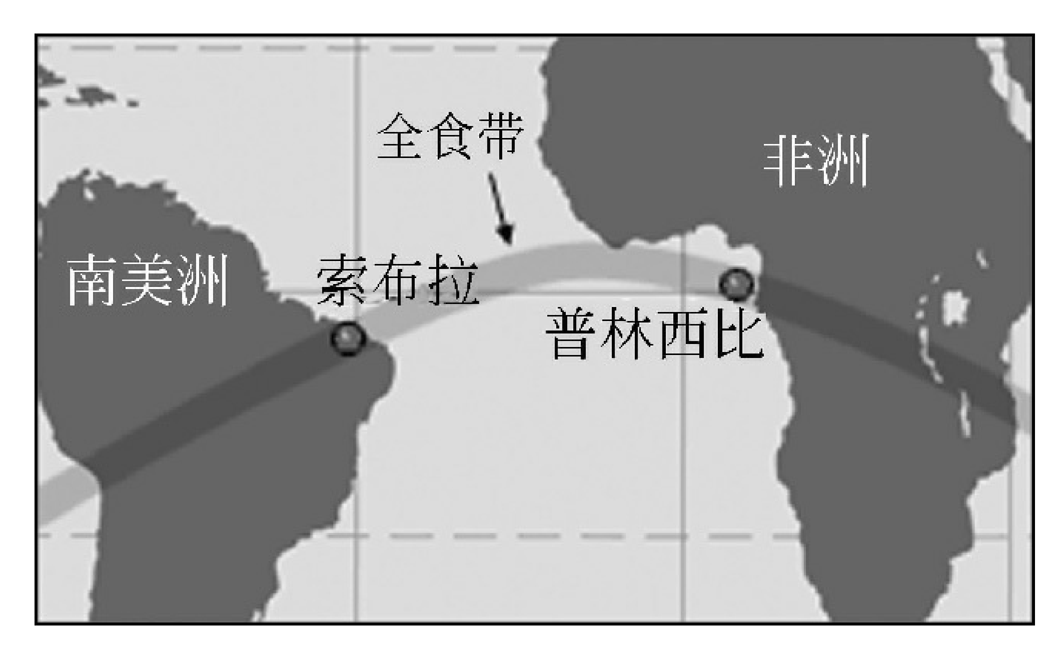


图5.2　1919年日食的全食带

不过，由于这两个地点远离英国本土，爱丁顿的计划能否实现，还得看战争能否及时结束。只有战争结束了，远征队才能平安穿越大西洋（否则会受到德国潜艇的威胁）。幸运的是，第一次世界大战的战火在燃烧了四年，付出了1 500万条人命的代价后，终于在1918年11月熄灭了。1919年3月，两支英国远征队如期出发，其中爱丁顿亲自率领的一支前往非洲的普林西比，另一支前往南美洲的索布拉。观测的过程想必大家早已在其他科普作品中读到过，本文就不赘述了，基本上就是环境是如何如何的闷热不堪，蚊虫是如何如何的“毁人不倦”，天气是如何如何的忽好忽坏，心情是如何如何的“此起彼伏”（宋丹丹语）。最终的结果是两支考察队都拍到了相片，满载而归。

接下来就是数据分析。爱丁顿后来很喜欢讲述的一个故事，是说远征队出发前他的助手曾经问戴森，假如观测到的结果是爱因斯坦预言值的两倍，会怎么样？戴森回答说，如果那样的话，爱丁顿就会发疯，而你只好一个人回来了。其实，主要的数据分析是在回英国之后才做的，爱丁顿即使要发疯也得回英国来发。由于数据比较微妙，分析过程持续

了较长时间。具体地说，索布拉远征队使用了两类不同的观测方法，一类用的是一架4英寸折射望远镜，拍摄的相片共有8张（其中一张因云层干扰而没能拍到星星，因此有效相片为7张），这些相片显示的偏折角度为1.98“，与爱因斯坦的预言比较接近，误差也相对较小。另一类用的是天体照相仪（astrograph），拍摄的相片共有19张，这些相片显示的偏折角度约为0.9”，与“牛顿值”比较接近，但这些相片的图像比较模糊，据怀疑是因为仪器中的定天镜（coelostat mirror）受热变形所致。爱丁顿自己那组用的也是天体照相仪，共拍摄了16张相片，但其中只有两张质量较好，经分析得到的偏转角度为1.61“，也比较接近爱因斯坦的预言。

那么结论是什么呢？爱丁顿作出了自己的选择，他以仪器有问题为由丢弃了0.9”那组比较接近“牛顿值”的结果，而保留了索布拉远征队的1.98“的结果，以及他自己那组其实也不怎么靠得住的1.61”的结果。这两组结果的平均非常接近爱因斯坦的预言。因此爱丁顿的结论是广义相对论对光线偏折的预言得到了证实。

1919年11月6日，英国皇家学会和皇家天文学会举行联合会议，正式宣布了爱丁顿的观测结果及结论。会议由电子的发现者，皇家学会主席，著名实验物理学家汤姆孙（J. J. Thomson，1856—1940）主持。在巨幅的牛顿画像前，戴森报告了观测结果，他表示，在仔细研究了相片之后，他认为它们毫无疑问地证实了爱因斯坦的预言。汤姆孙主席基本接受了这个乐观结论，表示这是自牛顿以来有关引力理论最重要的结果，是人类思维的最高成就之一。[6]特意从剑桥赶来参加会议的著名哲学家怀特黑德（Alfred Whitehead，1861—1947）后来在自己的著作《科学与当代世界》（*Science and the Modern World*）中回忆了当时的情形，他写道：

> 那种洋溢着浓厚兴趣的气氛完全是希腊戏剧式的。我们都齐声称颂着这一卓越事件在发展过程中所显示出的命运的律令。舞台本身就充满了戏剧性：传统的仪式和后面悬挂着的牛顿画像都在提醒我们，最伟大的科学成就在两个多世纪后的今天第一次得到了修正。

这无疑是科学史上的一个著名时刻，不过在那之前，爱丁顿的观测结果就在一个小范围内传开了。早在9月22日，洛伦兹就已经发电报将消息告诉给了爱因斯坦。稍后，10月4日，普朗克向爱因斯坦表示了祝贺。10月22日，普鲁士科学院院士，德国哲学及心理学家斯顿夫（Carl Stumpf，1848-1936）也向爱因斯坦表示了“最诚挚的祝贺”，并表示，在经历了军事和政治的失败后，德国科学能够取得这样的胜利令人感到自豪。而爱因斯坦在接到洛伦兹的电报后随即将消息转告给了已罹患重病的母亲（他母亲在几个月后就病逝了）。[7]

很多科普或传记作品在描述爱因斯坦得知爱丁顿观测结果后的反应时，喜欢渲染他的自信与超脱。毫无疑问，爱因斯坦对广义相对论有着极强的信心，但再好的理论也必须经过观测的检验。因此任何物理学家只要还在关心作为研究对象的大自然，就无法在一个重大的观测检验面前保持超脱，爱因斯坦也不例外。事实上，爱因斯坦一直非常在乎天文学家们对广义相对论的验证。拿光线的引力偏折来说，他不仅反复呼吁天文学家们对此进行检验，而且还在弗洛因德利希为1914年的远征筹集经费时，一方面动用自己的影响力给予帮助，另一方面表示若有必要，将亲自出资支持弗洛因德利希的观测。而在爱丁顿的结果出炉前，爱因斯坦也不止一次在给亲友的信中询问观测结果，或流露出等待结果的急切。

爱丁顿在1919年的故事大致就是这些。他后来把获得观测结果的那一刻称为自己一生最伟大的时刻。那一刻不仅是他个人的伟大时刻，而且也使爱因斯坦几乎在一夜之间获得了世界性的公众影响。但这些耀眼的光环并未让学术界失去应有的沉稳，对于爱丁顿处理观测数据的方法，很快就有人提出了质疑。由于篇幅关系，本文就不展开讨论那些质疑了。不过要指出的是，爱丁顿的论文如实列出了所有的观测数据，其中包括被他以仪器有问题为由丢弃的数据。他是在公布了全部数据的基础上进行自己的分析与取舍的。因此人们对他数据取舍的合理性虽然可以有各种看法，但如果把那种取舍渲染成类似于舞弊的行为则是很不恰当的。另外要指出的一点是，1978年，当爱因斯坦诞辰一百周年的日子即将到来时，当时任格林尼治天文台台长的默里（Andrew Murray）与同事哈维（Geoffrey Harvey）等人用包括计算机处理在内的现代手段重新分析了被爱丁顿丢弃的那些相片，结果发现它们所记录的星光偏折其实不是当年以为的0.9〃，而是1.55±0.34〃。因此即使是那些相片，也与爱因斯坦的结果更为接近。

当然，更重要的是，无论是广义相对论，还是其他科学理论，也无论已经出现了多么具有轰动效应的检验，新的检验都永远不会停息。在爱丁顿之后，更多的人对广义相对论产生了兴趣，在后来的日全食期间，更多的天文学家加入了检验的行列。再往后，随着技术的发展，日全食已不再是检验星光偏折的唯一机会，检验的精度也由原先的百分之几十提高到了万分之一量级。直到今天，人们依然在用各种手段检验着广义相对论的各种预言，科学就是这样一种不断自省、永不停息的努力。

---

[1]他的这篇题为《关于相对性原理和由此得出的结论》的综述是应德国《放射性与电子学年鉴》的编辑斯塔克（Johannes Stark，1874

—1957）的约稿而写的。斯塔克是德国实验物理学家，斯塔克效应（Stark effect）的发现者，1919年的诺贝尔物理学奖得主。他后来成为“德意志物理学”的狂热鼓吹者，对爱因斯坦展开了激烈攻击。但在1907年，两人的通信是完全彬彬有礼的，斯塔克对当时还在专利局的爱因斯坦的称呼是“非常尊敬的同事”，爱因斯坦对斯塔克的称呼则是“非常尊敬的教授先生”。

[2]这是爱因斯坦1911年原始论文所给出的数值，利用现代天文数据，爱因斯坦当年结果所对应的数值应为0.87″，完整的广义相对论预言则是1.75″。下文在引述各种当年所采用的数值时，将不再一一注释。

[3]不过即便没有战争的干扰，他们的观测也不可能成功，因为那天的全食期间太阳恰好被厚厚的灰云所遮盖。打算与弗洛因德利希合作的美国里克天文台（Lick Observatory）台长坎贝尔（William Campbell，1862—1938）带领的美国远征队当时也在那里，他们虽然未被扣留，却也因为天气原因而无功折返（返回时因战争原因，将仪器暂时留在了俄国）。坎贝尔后来在1918年6月8日的属于沙罗序列126的日全食期间再次进行了观测（那次的全食带经过美国）。但可惜他留在俄国的仪器因战争原因尚未运回，只能用一些临时拼凑的仪器，而当时的天气状况也不佳，拍到的相片质量很差。此外，在弗洛因德利希之前，1912年10月10日的属于沙罗序列142的日全食期间，曾有一支阿根廷远征队前往巴西进行观测，结果因遭遇雨天而失败。

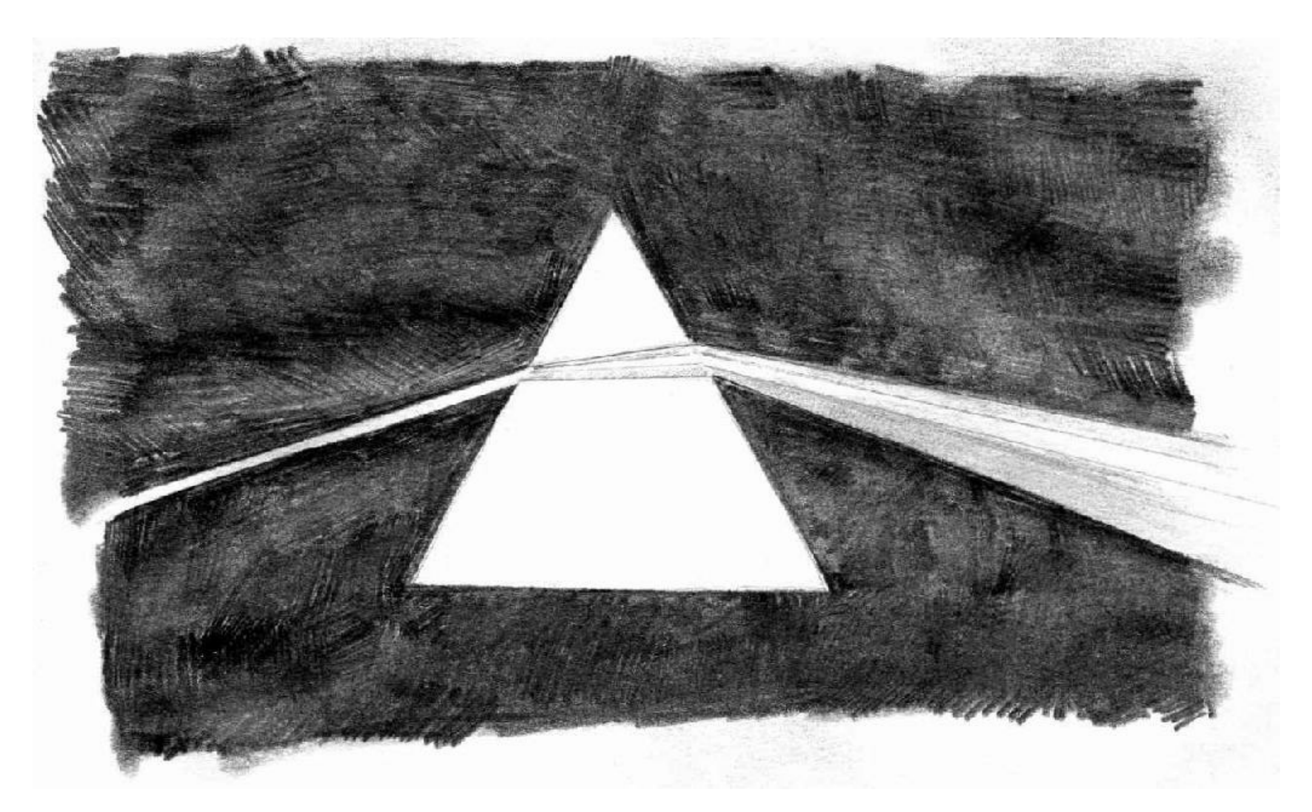
[4]有一个流传很广的故事说波兰人西尔维斯坦（Ludwik Silberstein，1872—1948）曾对爱丁顿说世界上只有三个人懂得广义相对论，而爱丁顿是其中之一。爱丁顿不置可否，当西尔维斯坦让他不要太谦虚时，他说：“不，我只是在想那第三个人是谁。”这个故事印

度裔美国物理学家钱德拉塞卡（Subrahmanyan Chandrasekhar，1910—1995）曾听爱丁顿亲口说过，因此应该是真的，只不过这个故事对广义相对论的难度显然有所夸大。事实上，即便在那时，除爱因斯坦和爱丁顿外，懂广义相对论的起码还应该算上希尔伯特（David Hilbert，1862—1943）、外尔（Hermann Weyl，1885—1955）、德西特等人。另外一个也流传很广的传闻是美国《纽约时报》散布的，说爱因斯坦将自己的某部文稿交给出版商时警告对方说世界上理解他的人不超过十二个。这个故事的真实性不得而知。钱德拉塞卡在他撰写的爱丁顿传记中认为，如果不是当年人们夸大了广义相对论的难度，很多20世纪六七十年代的工作在二三十年代就应该能很容易地实现。对于这个看法，当然是见仁见智，不过广义相对论的难度曾受到很大夸张是不争的事实。

[5]爱丁顿的拒服兵役能被英国当局容忍，还有一个原因是因为不久前的1915年，优秀的英国年轻物理学家莫塞莱（Henry Moseley，1887—1915）在战斗中阵亡。英国科学界在震惊之余，许多著名科学家出面为爱丁顿请愿，表示让像爱丁顿那样的杰出科学家参军不符合英国的长远利益。

[6]有很多作者在引述汤姆孙的话时，将之改为了“这是人类思想史上最伟大的成就之一——也许是最伟大的成就”，这后半句是加油添醋。当日的会议记录显示，汤姆孙并未说过那样的话。

[7]洛伦兹电报所传达的含义其实相当模糊，它的内容是这样的：“爱丁顿发现了太阳边缘的星光偏折，初步数值在9/10[角]秒及其两倍之间。”从这个电文中很难判断爱丁顿所证实的究竟是爱因斯坦还是牛顿。而爱因斯坦给他母亲的信中也只是笼统地写道：“今天有个好消息，洛伦兹来电报告诉我英国远征队证实了太阳使光线偏折。”



绘画：张京

6　阳光里的奥秘

在前面几章中，我们介绍了太阳的大小和远近，地心说vs日心说，日食的规律等。那些介绍所涉及的分析手段大都是几何手段。从本章开始，我们将介绍一类全新的手段：物理手段。我们将会看到，那是一类远比几何手段更有效的手段，在它的帮助下，科学家们很快就将太阳研究推向了纵深。这种从几何手段向物理手段的过渡，是与天文学自身的发展脉络基本一致的。因为在历史上，人们对天文学的研究首先是从研究天体运动的几何规律入手的，[1]用物理手段研究天文的所谓“天体物理”（astrophysics）这一重要分支则是在晚得多的时候才出现的（而且它的出现与本章所要介绍的内容有着密切关系）。

天文学沿这样的历史轨迹发展不是偶然的，拿太阳来说，想对它进行深入研究，首先必须克服一个显而易见的困难，那就是它离我们实在太远了（1.5亿千米），而且也实在太热了（表面温度就足以使任何已知的物质气化），我们几乎永远也不可能像研究地球一样到太阳上去钻个孔、挖个洞、采集一些样本。这一现实的困境曾使一些人深感悲观。1835年，实证主义哲学的创始人，法国哲学家孔德（Auguste　Comte，1798—1857）曾经预言，人类永远也不可能了解太阳和星星的化学组成。

幸运的是，与很多其他哲学家曾经发表过的有关科学的高论一样，孔德的预言很快就破灭了。因为太阳虽然很遥远，而且很热，但它却很慷慨地把一样东西送到了地球上，那就是阳光。这个初看起来很寻常的事实有着极不寻常的推论。有了它，我们这个星球才有生命。但阳光带

给我们的不仅仅是生命，还有信息，比如有关太阳化学组成的信息，这是孔德所不知道的。事实上，比孔德的预言早了20年，1814年，德国物理学家夫琅禾费（Joseph von Fraunhofer，1787—1826）就发明了一种新的仪器，叫做光谱仪（spectroscope），为人们解读阳光里的信息提供了工具。

不过在介绍夫琅禾费之前，我们先要“论资排辈”一下，向大家引见两位前辈。

这两位前辈中的第一位对所有人大概都是“久闻大名，如雷贯耳”的，他就是牛顿（Isaac Newton，1643—1727）。在17世纪60年代中期，牛顿做过很多光学实验，在其中一组实验中，他让阳光从一个小孔射入屋内，然后经过一个三棱镜，最后投射到一块屏上（彩图5）。他惊讶地发现，出现在屏上的居然是一个色彩缤纷的长椭圆形影像。虽然在牛顿那个时代，人们对光的本性还一无所知，但牛顿毕竟是牛顿，他敏锐地意识到——并且通过进一步的实验证实了——这一现象所揭示的有关阳光的重要性质：那就是阳光是由不同颜色的单色光组合而成的。出现在屏上的彩色影像，则是由于不同颜色的单色光在三棱镜中的偏折角度不同，而被投射到屏上的不同位置所产生的。如今我们知道，牛顿发现的这一现象就是所谓光的色散（dispersion），即不同波长（从而颜色各异）的光在色散介质中的折射率不同，从而偏折角度不同。而他在屏上看到的彩色影像则是最粗糙的阳光光谱——确切地说是阳光光谱中的可见光部分（这部分约占阳光总能量的40%）。牛顿的这一重大发现可以算是一种很原始的光谱分析（spectrum analysis），它是人类在探索光的本性道路上迈出的重要一步。[2]

但是从了解太阳的角度上讲，牛顿所看到的光谱却有一个问题，那

就是它不仅可以从阳光中得到，而且也能从其他白色或接近白色的光源中得到，因此它带给我们的信息似乎并不是太阳所特有的。那么，在阳光里是否还隐藏着更微妙的信息，甚至是太阳所特有的信息呢？由于牛顿不能长生不老，对这些问题的探索就要依靠牛顿之后的科学家了。可惜的是，牛顿实在超前得太多了，在接下来一百多年的时间里，无论科学家们怎么重复和改进他的实验，都只能看见与他看见过的相同的彩色影像。这影像会不会就是大自然给我们的终极答案呢？没有人知道，但科学家们没有气馁，他们持续不断地进行着新的尝试。正是因为科学界有这样的恒心和毅力，像牛顿那样的高人也终有被超越的一天。

功夫不负有心人，在19世纪到来后的第二年，1802年，一位英国化学家终于窥视到了黎明前的曙光。所不同的是，这缕曙光不是彩色，而是黑色的！发现这缕曙光的英国化学家就是我们要介绍的第二位前辈，他曾经是一位医生，后来转向了科学，他的名字叫做沃拉斯顿（William Wollaston，1766—1828）。

1802年，沃拉斯顿对牛顿的实验进行了重复和改进。他采用了质量很好的三棱镜，并用狭缝取代了牛顿的小孔（以便让更多的阳光进入），结果他发现了一个前人不曾发现过的细节：在那熟悉的彩色光谱中，存在几条很细的暗线。那些暗线是什么呢？沃拉斯顿作了一个猜测，认为它们大都是不同颜色之间的分界线。他的这个猜测在当时听起来是有一定道理的，因为他所发现的暗线只有寥寥数条，而人们描述光谱所用的颜色也只有寥寥数种（红、橙、黄、绿、蓝、紫等），两者之间的确存在粗略的匹配性。但他没有想到的是，那些看似不起眼的暗线，已经让他站在了一座巨大冰山的尖顶上。11年后，当那座冰山的更多部分显露在人们面前时，他的猜测就不攻自破了。

那位让人们窥知冰山更多部分的人，就是夫琅禾费（彩图6）。

夫琅禾费出生于一个光学仪器世家，父亲和爷爷都是玻璃工匠，母亲那一方与玻璃工艺的渊源更是可以回溯到17世纪早期。但很不幸的是，在夫琅禾费10岁和11岁时，他的母亲和父亲先后去世，慕尼黑的贫民窟里从此多了一位年幼的孤儿。在随后的几年时间里，夫琅禾费靠替一位镜片制造商做学徒维持着艰难的生计。1801年，厄运再次降临到他的身上，他所住的贫民窟里的“脆脆楼”垮塌了。好在14岁的他被人从瓦砾堆下救了出来，算是不幸中的万幸。夫琅禾费的悲惨遭遇引起了恰巧途经垮塌现场，后来成为巴伐利亚国王的马克西米利安一世（Maximilian I，1756—1825）的同情，在他的资助下，夫琅禾费进了学校，并在十年后成为了光学研究的高手。1814年，夫琅禾费发明了光谱仪。这种仪器的核心部分虽仍是三棱镜，但在三棱镜的前后分别用透镜或透镜组对光线进行了汇聚，从而大大提高了分辨率。

有了光谱仪的帮助，隐藏在阳光里的真正奥秘终于比较清晰地显露在了人们面前。与沃拉斯顿一样，夫琅禾费也看到了暗线。但他的光谱仪远比沃拉斯顿的三棱镜精密，因此他看到的暗线不是寥寥数条，而是有几百条之多，他对它们进行了仔细的编号。为了纪念夫琅禾费的贡献，人们把那些暗线称为了夫琅禾费线（Fraunhofer lines）。后来随着光谱仪技术的进一步改良（比如使用更好的三棱镜，更精密的透镜，使用光栅等），以及照相技术的加盟，人们在阳光光谱中观测到的暗线数目也越来越多。

但那些暗线到底是什么呢？这个曾经困扰沃拉斯顿的问题也困扰着夫琅禾费。他首先怀疑的是自己的仪器：那些暗线会不会是自己仪器的缺陷造成的呢？他对这种可能性进行了排查，排查的方法很简单，那就是观察其他光源。如果暗线是仪器的缺陷造成的，那就应该与光源无关，从而应该同样地出现在其他光源的光谱中。观察的结果很快排除了

那种可能性——其他光源的光谱中并没有出现同样的暗线分布。这样，夫琅禾费就得到了一个结论：太阳光谱中的暗线是阳光本身的特征。由于那些暗线看上去虽然繁杂，却每一条都有固定的位置（这也是夫琅禾费能对它们进行编号的基础），它们显然隐藏着某种奥秘，而且这奥秘必定与太阳有关。

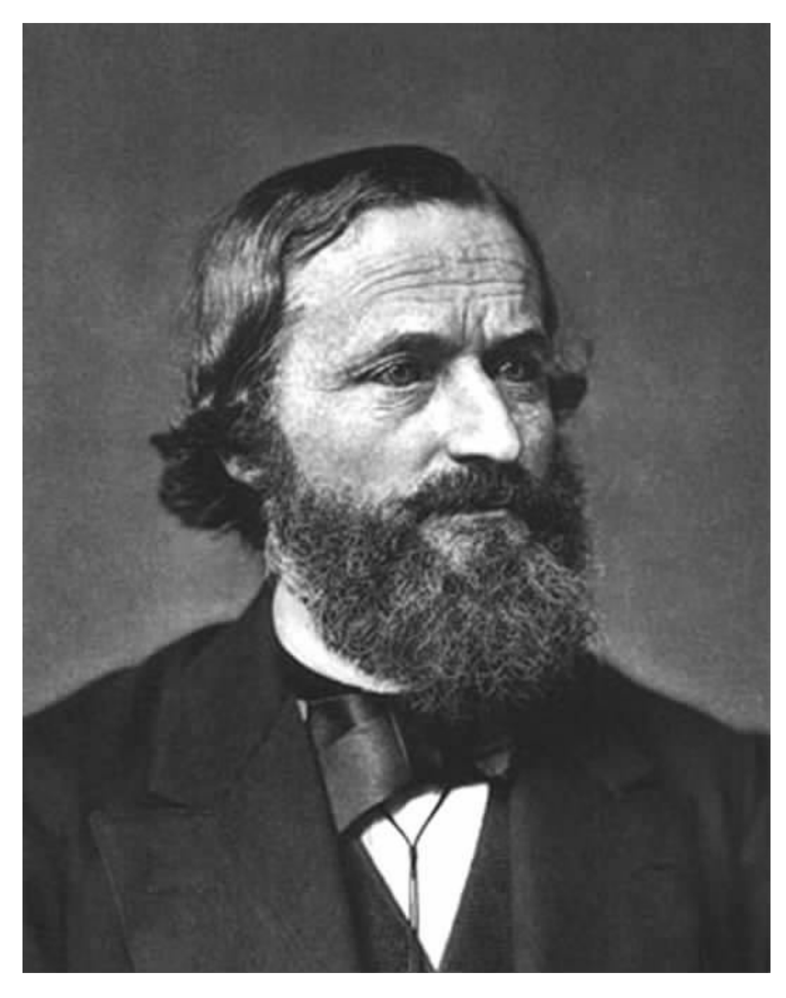
那么，这奥秘究竟是什么呢？夫琅禾费不知道，其他人也不知道。这局面多少有点尴尬，就好比已经发现了通往阳光奥秘的大门，却找不到开门的钥匙。这种尴尬局面持续了四十多年，在此期间，“功臣”夫琅禾费和沃拉斯顿，“反面陪衬”孔德等都先后离开了人世。

解密的日子终于到来了。

1859年，两位德国人在光谱研究上取得了突破性的成果。这两位德国人一位是化学家，名叫本生（Robert Bunsen，1811—1899），以他名字命名的“本生灯”（Bunsen burner）直到今天仍被许多化学实验室所使用；另一位是物理学家，名叫基尔霍夫（Gustav Kirchhoff，1824—1887），以他名字命名的“基尔霍夫电路定律”（Kirchhoff's circuit laws）直到今天仍是求解电路问题的重要工具。这两人当时都在海德堡大学（University of Heidelberg），本生当时正在研究化学元素被加热后所发射的光谱，那些光谱中有一些亮线，而且不同元素的亮线位置是不同的。本生打算利用这一特点作为证认化学元素的新手段。这在当时是一个很高明的想法。不过想法虽然高明，他用来观测光谱的设备却是滤色片一类老掉牙的东西，精度很低。这时候，他的朋友基尔霍夫给他支了一招，建议他使用光谱仪。本生采纳了这一建议。在接下来的一段时间里，本生和基尔霍夫进行了合作，他们不仅证实了每种化学元素都有自己独特的光谱，就像每个人都有自己独特的指纹一样，而且还通过光谱研究发现了两种新元素：铯（Cesium）和铷（Rubidium），显示了这

种手段的巨大威力。

在研究中，基尔霍夫自己也作出了一生中又一项重要发现。他注意到，如果某种元素在加热后所发射的光谱中有某些亮线，那么当光穿越由该元素制成的稀薄冷蒸气时，在光谱中原先的亮线位置上就会出现暗线。由于亮线源于光的发射（相应的光谱被称为发射光谱），暗线源于光的吸收（相应的光谱被称为吸收光谱），因此基尔霍夫的发现也可以表述为：一种元素能发射什么样的光，它也就能吸收什么样的光，两者相互对应。这个重要规律后来被称为基尔霍夫热辐射定律（Kirchhoff's law of thermal radiation）。[3]现在我们知道，光谱线是电子在不同能级之间跃迁产生的：电子从高能级跃向低能级时会发射能量，由此产生的是发射光谱，从低能级跃向高能级时会吸收能量，由此产生的就是吸收光谱。由于这两者是由同一组电子能级决定的，它们之间相互对应也就不足为奇了。不过这一切直到20世纪初才随着量子理论的发展而被人们所了解。在基尔霍夫的时代，人们对光谱线的了解还停留在“知其然，却不知其所以然”的水平上，基尔霍夫热辐射定律也只是一个经验规律。



德国物理学家基尔霍夫（1824—1887）

但把这一经验规律与他和本生所做的事情联系起来，基尔霍夫立刻意识到了这一整套方法的重要价值。很明显，太阳光谱中的夫琅禾费线——那成百上千条的暗线——正是太阳上的吸收光谱，[4]既然吸收光谱与发射光谱是相互对应的，那么我们只要将夫琅禾费线与已知元素的发射光谱相比较，就可以证认出太阳上的元素。这样，基尔霍夫就找到了开启大门，破解阳光奥秘的钥匙。对于基尔霍夫的这一重要发现，本生曾经作过这样的记述：

> 基尔霍夫和我现在正忙于一种让我们夜不能寐的研究之中。基尔霍夫做出了一个有关太阳光谱中暗线起因的奇妙的、完全出人意

料的发现。他能在太阳或火焰的连续光谱中，在与夫琅禾费线严格对应的位置上，以人工加强的方式产生出那些暗线。这就找到了一种方法，能让我们像确定化学试剂中的氯化锶那样精确地确定太阳和星星的组成。

利用基尔霍夫的发现，科学家们很快就在太阳光谱中证认出了大量和地球上相同的元素（孔德同学的悲观预言正式入住历史博物馆）。有些读者或许还记得，我们在第3章中曾经提到过一种叫做“天贵地贱”的古代观念，按照那种观念，完美的天体和卑微的地球是由完全不同的质料组成的。那种观念后来因伽利略发现太阳黑子而遭到了驳斥。不过，伽利略所驳斥的只是天体的完美性，对那种观念的真正毁灭性的打击，则是来自人们对天体化学成分（即所谓质料）的了解，因为是它直接证实了天体与地球由相同质料所组成，而这正是光谱学手段的功劳。

随着研究的深入，科学家们不再满足于像牛顿那样利用普通的日光来做研究，他们开始寻找新的机会，其中最重要的机会就是日全食。在1868年8月18日的日全食（属于沙罗序列133）期间，法国天文学家詹森（Pierre Janssen，1824—1907）远赴印度观测了太阳光谱，结果在太阳大气层中的色球层（chromosphere）的光谱中发现了一条波长为5 875 Å的黄色亮线。[5]不同寻常的是，这条亮线在地球上任何已知元素的发射光谱中都找不到对应。这是怎么回事呢？是詹森搞错了吗？有可能，但这种可能性很快就被排除了，因为两个月后，英国天文学家洛克耶（Norman Lockyer，1836—1920）也在对同一次日全食的光谱记录中发现了同样的亮线。两组独立的观测同时搞错，而且错得一模一样的可能性无疑是很小的。

看来那条亮线并不是错误，既然不是错误，那它是什么呢？联想到

本生和基尔霍夫通过光谱学手段发现新元素的故事，这一问题的答案显然已呼之欲出。是的，答案就是新元素——一种在地球上尚未被发现过的新元素。由于这一元素是在太阳上发现的，洛克耶将之命名为“氦”（Helium），这个名称来自表示太阳的希腊语helios（ἥλιος）。不过，氦虽然是在太阳光谱中被发现的，它作为“太阳元素”的身份却并未维持很久。1895年，人们在地球上也发现了这种元素。光谱学方法不仅让我们了解了太阳的化学组成，而且还帮助我们发现了新元素。追根溯源，这一切当然都离不开夫琅禾费所发明的光谱仪，它是如此地卓有成效，以至于英国天文学家德拉鲁（Warren De la Rue，1815—1889）曾经表示，即便我们能跑到太阳上去，把一些太阳上的物质拿到实验室来研究，也不会比用光谱仪得到的结果更精确。为了纪念夫琅禾费的重大贡献，人们在他的墓碑上刻下了这样一句墓志铭：他使星星变得更近。事实上，他不仅使星星变得更近，还为一个新领域的开创奠定了基础，因为整个天体物理学都是随着光谱学方法的应用而产生的。

氦元素的发现引起了人们对日全食太阳光谱的更大兴趣。第二年，1869年8月7日的日全食（属于沙罗序列143）期间，天文学家们又对太阳光谱进行了仔细观测，结果居然又有新的斩获：他们在比色球层更外部的所谓日冕（corona）的光谱中发现了一条波长为5 303 Å的绿色亮线。这条亮线在所有已知元素的发射光谱中也找不到对应。在随后的若干年里，这样的新发现一而再，再而三地出现，人们在日冕光谱中发现的新谱线居然增加到了24条之多。看来除了氦以外，太阳上还有其他新元素。至于那24条新谱线是来自一种还是多种新元素，暂时还没法知道，人们姑且先取了一个名字，叫做“氪”（coronium），它来自日冕的英文名corona。但与后来在地球上找到了的氦不同的是，那神秘的“氪”元素从未在地球上露过面。难道“天贵地贱”的古老观念毕竟还是有那么一丁点儿的正确，太阳上毕竟还是有一些地球上不存在的元素吗？这

个疑问直到20世纪30年代后才真相大白，原来并不存在什么“氪”元素，那些日冕光谱中的新谱线乃是来自一些被剥去了外层电子后的金属离子（比如铁离子、钙离子和镍离子）。以那条5 303 Å的绿色亮线为例，它是来自被剥去了13个电子（占总数的一半）的“无上装”铁离子（Fe^{13+}）的发射光谱。

现在我们知道了太阳上有哪些元素。但科学家们的胃口比这更大，他们不仅关心太阳上有哪些元素，而且还想知道它们各自所占的比例——用天文学家们的术语来说，叫做元素的丰度（abundance）。这对于进一步探索发生在太阳上的物理过程具有极大的重要性。幸运的是，物理学的威力完全能满足科学家们这一得寸进尺的要求。

推算元素的丰度从技术上讲并不容易，但基本原理却并不复杂。我们已经知道，谱线的位置可以用来确定元素的存在，但谱线带给我们的信息并不只是位置。当我们观测到一条谱线时，还会得到另一条信息，那就是谱线的强度。这条额外信息所携带的正是有关元素丰度的知识。为什么呢？因为无论吸收光谱还是发射光谱，它的强度都与产生谱线的元素的丰度有关，丰度越大，谱线就越强，反之，丰度越小，谱线则越弱。知道了这一关系，我们就可以用谱线的强度来反推元素的丰度。当然，这是典型的“站着说话不腰疼”，实际计算起来有许多技术性的困难需要克服，因此这种计算直到1925年才有人去做。



英国天文学家佩恩（1900—1979）

最早进行这种计算的是一位年仅25岁的女博士，名叫佩恩（Cecilia Payne，1900—1979），出生于英国。1919年，当爱丁顿验证广义相对论的故事风靡世界的时候，她有幸聆听了爱丁顿的讲座，从此爱上了天文学。不过在英国这样一个社会习俗比较保守的国家里，女性从事天文研究是很困难的（其实别说从事天文研究，她所就读的剑桥大学当时甚至不给女性颁发学位），于是她远渡重洋到美国去读博士。在读博士期间，佩恩对太阳上的元素丰度进行了研究。1925年，她的研究得出了一个惊人的结果：这个太阳系里最重的天体竟然主要是由元素周期表上最轻的元素——氢和氦——组成的！虽然当时人们对太阳上的元素丰度还一无所知，但自从“天贵地贱”的观念破灭之后，很多人已经想当然地走

到了另一个极端，认为太阳和地球有着相似的组成。在这种情形下，佩恩也知道自己的结果有点骇人听闻，为保险起见，她在发表前特意征求了一下当时恒星光谱研究的权威，著名美国天文学家罗素（Henry Russell，1877—1957）[6]的意见。

没想到这一征求征出了苦恼，因为罗素给了她一个很负面的回答，他表示佩恩的结果是“显然不可能的”。受罗素的威名所慑，佩恩修改了论文的措辞，表示自己所发现的氢和氦的丰度“被认为是有问题的”，“几乎可以肯定是不符合实际的”。这样的措辞很快就被证实为是谦虚得过火了。因为在接下来的几年间，其他天文学家们也陆续独立地得到了与佩恩一样的结果。四年之后，就连罗素本人也得到了同样的结果。在铁的事实面前，罗素终于意识到自己错了，在他的论文中，他宣布自己的结果与四年前佩恩的结果有着“很令人满意的一致”。权威毕竟是权威，四年前，因为罗素的影响，佩恩修改了措辞，弱化了结论，而四年后，同样也是因为罗素的影响，佩恩的结果加速成为了主流，她的博士论文更是被誉为了天文学领域中最重要的博士论文。在那之后，佩恩继续从事着天文学研究。1934年，她与一位俄国天文学家结了婚。1956年，她成为了哈佛大学有史以来第一位女性正教授及系主任。

如今我们知道，太阳是一个巨大的“氢气球”，在它的总质量中，氢占了71%（在原子数目中则占了91.2%），氦占了27.1%（在原子数目中则占了8.7%），其余所有元素加起来也只占不到2%（在原子数目中则只占不到0.2%）。事实上，不仅太阳如此，绝大多数“青壮年”时期的恒星都是如此，甚至在目前整个宇宙的可见物质中，氢和氦也是绝对的“主流”。

在本章的最后，我们要对元素丰度的计算再作两点补充。细心的读

者也许注意到了一个问题，那就是太阳光谱——无论吸收光谱还是发射光谱——主要来自太阳大气层，因此通过光谱学研究得到的元素丰度应该是针对太阳大气层而非整个太阳的。事实的确如此。不过另一方面，太阳是一个高温气态的星球，托这种恶劣环境的福，在太阳内部很大的体积范围内都存在强烈的对流，使得太阳大气层的元素丰度与内部基本一致。不仅如此，对太阳模型及太阳起源的研究都显示，即便在不存在显著对流的区域，元素丰度仍与外部接近（唯一的例外是核心区）。因此，我们通过光谱学手段得到的元素丰度是对太阳整体元素丰度的一个不错的近似（确切地说是重元素丰度略微偏低）。

另一点需要补充的是，有关太阳元素丰度的计算需要用到统计物理、量子力学等领域的知识，且计算量相当巨大，很容易出错。这其中有一个著名的例子，那就是人们在铁元素丰度计算的量子力学部分中曾经犯过一个错误，导致铁元素的丰度被低估了90%，那个错误直到1968年才被纠正。除计算量巨大外，元素丰度计算所面临的另一类困难，是有些元素——比如氦——的谱线产生于色球和日冕中的一些远离平衡态的区域，从而很难建立理论模型。不过，我们今天所知的太阳元素丰度已经不单纯是光谱分析的结果，而是得到了一些其他手段，比如日震学（helioseismology）手段的印证，因此具有比单一手段更大的可靠性。

---

[1] 当然，在几何规律的背后有着动力学的规律，比如牛顿运动定律和万有引力定律。不过在太阳系中，太阳是一个例外，它的质量远大于行星质量，具备“稳坐钓鱼台”的资格，因此在研究太阳时较少涉及动力学。

[2] 牛顿的三棱镜实验是从1664年开始的，比较完整的实验则是在1666年初做的。在牛顿之前，也有学者注意到过类似的现象，并提出过

类似的想法（但都不如牛顿的细致和系统）。比如出生于爱尔兰的英国科学家玻意耳（Robert Boyle，1627—1691）曾用三棱镜观察到过阳光里的彩色；牛顿的老冤家英国科学家胡克（Robert Hooke，1635—1703）则曾经提出过颜色由蓝色与红色两种基色组成的想法（后来被牛顿推翻）。

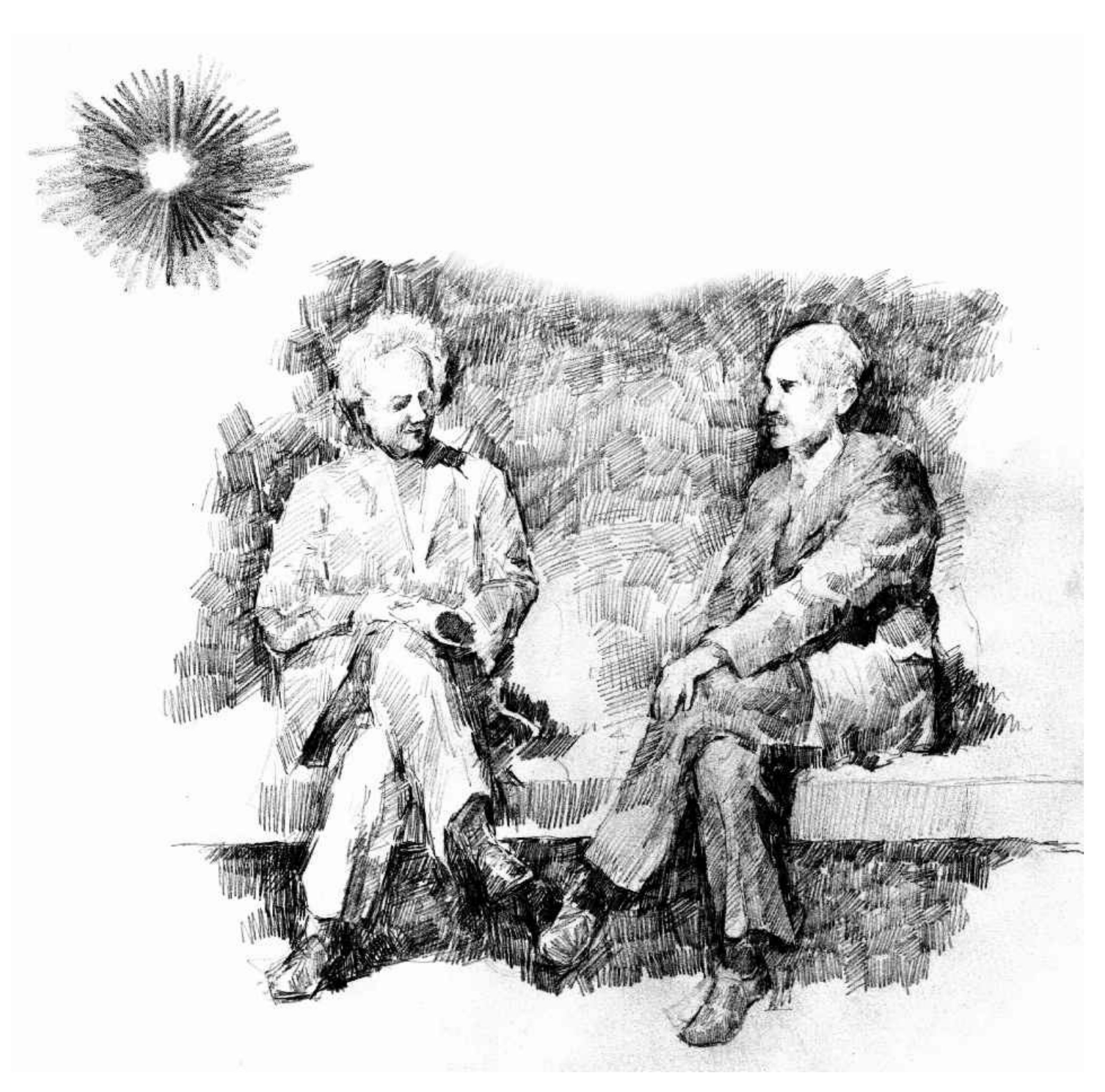
[3]我们在前面曾经提到过，为了判定太阳光谱中的暗线是否来自仪器缺陷，夫琅禾费曾检验过其他光源，他当时也注意到了太阳光谱中的某些暗线对应于普通光源中的亮线，可惜他没有对之作进一步的考察，从而错过了作出同样发现的机会。

[4]细心的读者也许会提出两个问题。一个是：基尔霍夫热辐射定律中的吸收光谱是由冷蒸气产生的，太阳上的温度那么高，为什么也有吸收光谱？答案是：所谓“冷蒸气”是相对于光源温度而言的。太阳吸收光谱主要来自太阳大气层中的光球层（photosphere），那里的温度用日常标准来衡量虽然极高，相对于太阳内层而言，却是一个“凉风习习”的地方，它的吸收作用大于发射作用，因而仍是“冷蒸气”。第二个是：阳光从太阳来到地球，除穿越太阳大气层外，还必须穿越地球大气层，那么，夫琅禾费线会不会是来自地球大气层呢？答案是：的确有少数夫琅禾费线是来自地球大气层的，比如被夫琅禾费标记为A和B的两条暗线实际上是来自地球大气层中的氧分子。在地球大气层之外观测太阳光谱时就不会看到那两条暗线。

[5]1Å=10^{-10}m。读者也许会觉得奇怪，太阳的光谱是吸收光谱，光谱线不都是暗线吗？怎么忽然冒出一条亮线来了？这是有原因的，原因就是色球层中存在比内层温度更高的区域，使光谱由吸收光谱变成了发射光谱（由此可见，光谱不仅能帮我们辨认太阳上的元素，还能带给我

们有关太阳温度的信息）。除色球层夕卜，下文即将提到的日冕中的亮线也是如此。至于色球层与日冕这两个太阳大气层的外围区域为什么反而会有高温，我们将在第13章中加以介绍。

[6]读者请勿将这位罗素与哲学家罗素（Bertrand Russell，1872—1970）混淆起来。此罗素非彼罗素。此罗素是一位天文学家，他一生最著名的工作是与丹麦天文学家赫茨普龙（Ejnar Hertzsprung，1873—1967）各自独立地发现了恒星的光谱类型与光度之间的关系，即著名的赫罗图（Hertzsprung-Russell diagram）。



绘画：张京

7　物理自助游：推算太阳的质量、光度和表面温度

自第6章开始，我们的太阳故事已延伸到了物理领域。由于我们有关太阳的现代知识几乎全都来自物理手段，因此在本章及以后的多数章节中，我们将继续与物理“亲密接触”。说到物理，很多读者的脑海里也许会浮现出中学物理课上学过的一些基本概念，这其中很重要的一个就是被牛顿称为“物质的量”（quantity of matter），并在其名著《自然哲学的数学原理》的第一页上就试图定义的概念：质量。

这样一个重要概念当然也适用于太阳。本章的第一个任务，就是要查一查太阳的“资产”——它的“物质的量”。对于我们日常生活中接触到的普通物体来说，测定质量是一件毫不困难的事情。天平、杆秤、磅秤等都可以帮我们达到这一目的。这些测量手段有一个共同特点，那就是借助于所谓的静力学平衡手段。在历史上，早在质量的含义还仅仅停留在字面意义上那个“物质的量”，而不涉及像惯性和引力那样的动力学性质的年代里，人们就是用这类手段来测定质量的。

但是，就像大小和远近这样的简单测量一涉及太阳就变得不再轻而易举一样，质量的测定一涉及太阳，也就立刻变得棘手了。无论天平、杆秤还是磅秤，想用来测定太阳的质量，都无异于是白日做梦。怎么办呢？我们想起了第6章的思路。在第6章中我们介绍过，为了探索太阳的化学组成，科学家们研究了阳光，它给我们带来了远在1.5亿千米以外的太阳的信息。那么，除阳光外还有没有别的什么东西也能够不受遥远距离的阻隔，为我们带来有关太阳的信息呢？有，那就是引力，它不仅能向我们申报太阳的“资产”，而且还采取了一种我们自己就能实践的方

式，为我们再次开展“自助游”活动提供了便利。

我们这次自助游所采用的将是物理手段，其中首先要利用的就是引力。

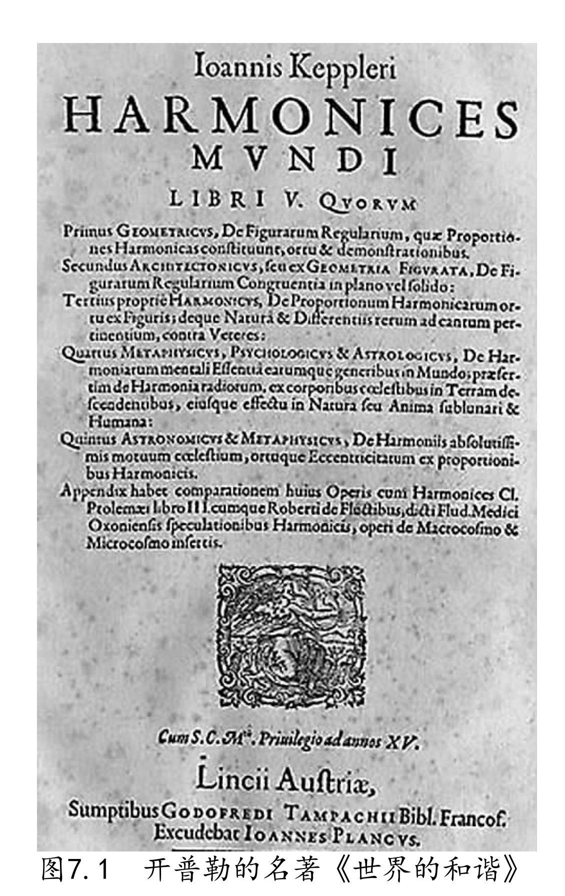
与上次自助游所采用的几何手段不同，人们对引力的了解要晚得多。如果我们想再玩一次重返古希腊之类的游戏的话，我们要重返的将不是古希腊，而是17世纪。另外，与阳光能够直接产生视觉不同，引力本身是看不见摸不着的。了解引力的主要途径，是研究它所导致的物体——尤其是天体——的运动，这正是17世纪科学家们曾经做过的事情。不过17世纪毕竟不同于古希腊。古希腊的很多推理在今天已是一些中小学生都能理解或反驳的，但17世纪的某些科学成就即便在今天，也足以难倒不少理工科的大学生。因此本章虽也号称“自助游”，却不能像上一次那样“徒步”进行，而需要先介绍一些17世纪的东西，作为代步工具。当然，这样做的另一个目的是让整本书的内容更加完整。

我们刚才提到，了解引力的主要途径，是研究它所导致的物体——尤其是天体——的运动。这种研究曾经导致了像日心说那样的重大天文进展。但对于了解引力本身而言，真正的进展却是出现在17世纪初期的1609年。那一年，一位德国天文学家发表了几项重大成果。此人的大名我们在第3章中已经提到过，他就是开普勒。是他，发现了行星运动的椭圆轨道，将沿用两千年的超级教条——天球——送进了历史博物馆；同样也是他（而不是哥白尼），使日心说在精度上超越了地心说。

但在作出这些辉煌成就的同时，他也亲手葬送了一个13年前（1596年）由他自己提出，且受他钟爱的模型。那个模型将当时已知的太阳系六大行星（水星、金星、地球、火星、木星、土星）的天球用三维空间中仅有的五种正多面体（正八面体、正二十面体、正十二面体、正四面

体、正六面体）以内切和外接的方式相分隔。那个模型不仅让开普勒一度以为发现了上帝创世计划中最宏伟的几何设计，而且还引起了当时已负盛名的丹麦天文学家第谷[1]（Tycho Brahe，1546—1601）的注意。1600年，开普勒应邀成为了后者的助手。一年后，第谷去世，他的职位及观测数据都被开普勒所继承。在望远镜时代来临之前，第谷的观测数据堪称举世无双。正是有那样精密的数据做后盾，加上自己的常年努力，开普勒才发现了他的行星运动定律，追根溯源，很多缘分都来自他当年那个模型。可惜再珍贵的模型如果与观测不符，也只能被放弃。假如科学研究本身也有定律的话，这或许就是第一定律，而开普勒很了解这一定律。

开普勒在1609年所发表的不仅有被称为开普勒第一定律的行星椭圆轨道，而且还有所谓的开普勒第二定律，即行星与太阳的连线在单位时间内扫过恒定的面积。但这两条定律加在一起，似乎也赶不上当年那个模型所具有的和谐与秩序。那个模型虽然被迫放弃了，开普勒却深信它所体现的和谐与秩序必定还有其他体现方式，为此他继续进行着不懈的探索。十年之后（1619年），他终于找到了一条新的规律。他为这一新规律撰写了一部新著作（图7.1），书名就叫《世界的和谐》（*Harmony of the Worlds*）。在那部著作中，他提出了自己的第三定律：行星轨道半长径（即椭圆轨道长轴长度的一半）的三次方与轨道周期的平方之比是一个常数。


Ioannis Keppleri
HARMONICES
MVNDI
LIBRI V. QVORVM
Primus GEOMETRICVS, De Figurarum Regularium, quæ Proportiones Harmonicas constituunt, ortu & demonstrationibus.
Secundus ARCHITECTONICVS, seu ex GEOMETRIA FIGVRATA, De Figurarum Regularium Congruentia in plano vel solido:
Tertius propriè HARMONICVS, De Proportionum Harmonicarum ortu ex Figuris; deque Naturâ & Differentiis rerum ad cantum pertinentium, contra Veteres:
Quartus METAPHYSICVS, PSYCHOLOGICVS & ASTROLOGICVS, De Harmoniarum mentali Essentiâ earumque generibus in Mundo; præsertim de Harmonia radiorum, ex corporibus cœlestibus in Terram descendentibus, eiusque effectu in Natura seu Anima sublunari & Humana:
Quintus ASTRONOMICVS & METAPHYSICVS, De Harmoniis absolutissimis motuum cœlestium, ortuque Eccentricitatum ex proportionibus Harmonicis.
Appendix habet comparationem huius Operis cum Harmonices Cl. Ptolemæi libro III. cumque Roberti de Fluctibus, dicti Flud. Medici Oxoniensis speculationibus Harmonicis, operi de Macrocosmo & Microcosmo insertis.

Cum S.C.Mtis. Privilegio ad annos XV.
Lincii Austriæ,
Sumptibus GODOFREDI TAMPACHII Bibl. Francof.
Excudebat IOANNES PLANCVS.

图7.1　开普勒的名著《世界的和谐》

开普勒第三定律是一条非常漂亮的定律，任何人只要看一眼那些数据之间近乎完美的关联，就不难欣赏到它的美。开普勒本人对它也非常满意，称之为“和谐定律”（Harmonic Law）。开普勒的这些定律是牛顿之前人们在研究天体运动方面所达到的最高成就，为最终发现万有引力定律做出了重要铺垫。不过对于我们想要做的事情，即推算太阳的质量来说，它们还不够，因为其中还缺少一样东西，那就是质量这个主角。事实上，开普勒三大定律全都是运动学定律，只涉及时间和空间这样的运动学概念，而没有质量和引力那样的动力学概念。[2]

为了推算太阳的质量，我们还得等一个人，一个将质量概念全面引进物理的人，一个能对引力作出数学描述的人，这个人就是牛顿。公元1687年，牛顿发表了巨著《自然哲学的数学原理》。在这部著作中，他完整地阐述了自己的三大运动定律及万有引力定律，为物理学的发展开辟了崭新的道路。用另一位科学巨匠爱因斯坦的话说，牛顿所发现的道路在他那个时代“是一位具有最高思维能力及创造力的人所能发现的唯一道路”。

沿着这条“唯一道路”，人们对开普勒三大定律有了更深入的了解，那三大定律不仅适用于行星绕太阳的运动，而且也适用于卫星绕行星的运动。那么，我们所关心的东西——质量——在哪里呢？就在开普勒第三定律中的那个常数——即轨道半长径的三次方与轨道周期的平方之比（以下简称“开普勒常数”）——里。利用牛顿的运动定律和万有引力定律可以很容易地证明，那个常数正比于中心天体的质量。[3]

主角终于露面了！

既然质量就出现在开普勒常数中，那我们是不是就可以用开普勒第三定律来计算太阳质量了呢？很遗憾，答案暂时还是否定的。因为质量

在开普勒常数中的出现还捆绑了一个陌生的、来自牛顿万有引力定律的东西：万有引力常数。开普勒常数正比于中心天体的质量是不假，但在比例系数中却包含了万有引力常数。因此只有知道了万有引力常数的数值，才能真正推算天体的质量。但万有引力常数的数值是多少呢？很可惜，那在牛顿时代还是一个谜。

搞了半天，原来是空欢喜一场。质量虽然出现了，却“犹抱琵琶半遮面”。但即便如此，我们依然有一件事情可以做，那就是推算太阳质量与地球质量的比值。推算的方法很简单：既然开普勒常数正比于中心天体的质量，那就说明地球轨道（它的中心天体是太阳）的开普勒常数正比于太阳质量，而月球轨道（它的中心天体是地球）的开普勒常数正比于地球质量，它们的比值则等于太阳质量与地球质量之比。这个计算是我们现在就可以做的，那个暂时让人摸不清路数的万有引力常数在计算比值时会自动消去。这个计算所需的全部数据都已在第1、2两章中介绍过了，即：

- 地球的轨道半长径（很接近太阳离我们的平均距离）：150 000 000千米
- 地球的轨道周期（恒星年）：365.24天
- 月球的轨道半长径（很接近月球离我们的平均距离）：384 400千米
- 月球的轨道周期（恒星月）：27.3天

由此可以得到：

- 地球轨道的开普勒常数：2.5×10^{19}
- 月球轨道的开普勒常数：7.6×10^{13}

当然，这两者都是有量纲的。（请读者想一想，它们的量纲是什么？）不过这量纲跟万有引力常数一样，会在求比值时自动消去，因此不必理会。这两个常数的比值约为330 000。这样我们就得到了一个重要结果：太阳的质量约为地球质量的33万倍。将之与我们在第2章中已经得到的“太阳的直径约为地球直径的109倍”联系起来，我们立刻可以得出另一个重要结论，太阳的平均密度约为地球平均密度的1/4，这跟我们在第5章末尾介绍过的太阳上轻元素占很大比例的结果在定性上是一致的。[4]

现在我们的处境与第2章中曾经遇到过的相差无几了，即有关太阳的数字已经与有关地球的数字连在了一起。如果我们有办法知道地球的质量，就可以顺藤摸瓜地得到太阳的质量。但问题是，地球的质量虽然只有太阳质量的三十三万分之一，却同样是不能拿天平、杆秤、磅秤之类的工具来测量的。为了测定地球的质量，我们同样必须借助引力。而一旦涉及引力，万有引力常数就是一道绕不过去的坎。

既然绕不过去，就只好放手一搏了。那么，怎样才能知道万有引力常数的数值呢？很简单，那就是测定一对质量已知的物体之间的引力。这个答案对谁都不是秘密，但万有引力常数却对谁都是秘密，因为这个答案所提议的测定在当时是连牛顿也没法办到的；因为引力这个貌似强大、能把硕大无朋的天体玩得团团转的力量，其实却是自然界中最微弱的相互作用。它的强大纯粹来自“集体的力量”，因而只有在天文尺度上才是显著的。可是天文尺度上的物体——即天体——的质量却全都指着万有引力定律来测定，这就变成了一个先有鸡还是先有蛋的问题：要想知道天体的质量，首先得知道万有引力常数的数值；而要想知道万有引力常数的数值，又首先得知道某些天体的质量。

这个近乎死循环的局面直到一百多年后的1798年才被打开。那一年，英国科学家卡文迪许（Henry Cavendish，1731—1810）通过一个极精巧的扭秤实验（图7.2），破天荒地直接测定了两个普通物体（它们的质量当然是已知的）之间极为微弱的引力。虽然卡文迪许的目的是测定地球的平均密度（由此也可以直接得到地球质量），但从他的数据中不难算出万有引力常数的数值为6.75×10^{-11}（这是国际单位制下的数值，量纲留给读者自行推算）。自那以后很多其他人也对万有引力常数进行了测定。引力在日常尺度上的微弱性给所有这类测定设置了公平的障碍，从中反衬出的则是卡文迪许的高超技艺，因为他所达到的精度直到一个多世纪后才有人超越。对万有引力常数的测定直到今天依然是一件很困难的事情。截至2006年，国际科技数据委员会（CODATA）对这一常数的最佳推荐数值为$6.674\ 28\times10^{-11}$，相对误差约为万分之一。在所有基本物理常数中，这样的精度就算不是最低，也是接近垫底的。不过太阳和地球这样的庞然大物毕竟不是每盎司都得斤斤计较的黄金珠宝，这样的精度对于测定它们的质量来说已是绰绰有余了。

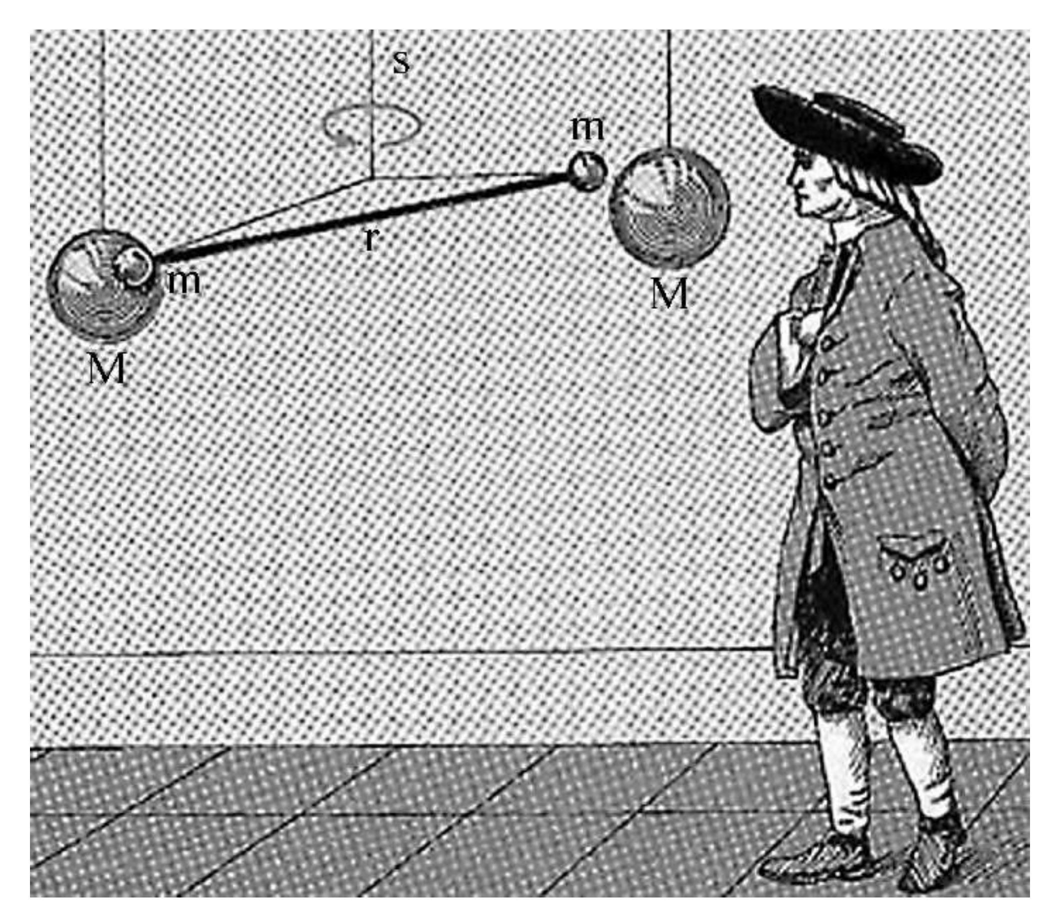


图7.2　卡文迪许的扭秤实验

知道了万有引力常数，我们就可以计算太阳和地球的质量了。计算的方法很多，既可以用开普勒第三定律，也可以通过其他方法，其中最简单的或许是将我们熟悉的地球表面重力加速度（9.8米/秒^2）与万有引力定律给出的加速度相对比。[5]既然是自助游，这点小小的计算就留给读者们自己享用了，计算的结果将会表明：地球的质量约为6×10^{24}千克。[6]将这一结果与前面已经推算出的太阳质量与地球质量的比值联系起来，就立刻可以得到太阳的质量约为$2×10^{30}$千克。

这样我们就完成了本次自助游的第一站：查明太阳的“资产”。“资产”既已查明，接下来我们就要去关心一下太阳的“开销”了，即它以电磁辐射（以下将笼统地称为“光”）的形式每秒挥霍掉的能量。天文学家

们把这种挥霍速度称为太阳的光度（luminosity）。

推算太阳光度的思路很简单，那就是测定地球公转轨道附近单位时间内垂直入射到单位面积上的阳光能量，即所谓的太阳常数（solar constant）。由于太阳很均匀地把光明洒向人间，因此一旦知道了太阳常数，将它乘上半径1.5亿千米（即地球公转轨道半径）的虚拟球面的面积，就可以得到太阳的光度。

那么怎样才能测定太阳常数呢？最简单的办法就是在阳光直射地面的时候，在地上放一盆“单位面积”的凉水，然后观察它在“单位时间”内的温度升高。将这一温度升高乘上水的比热和质量，就可以得到水从阳光中吸收的能量。在理想条件下，这个能量就等于太阳常数。当然，在实际实验中，阳光未必直射地面，水面面积未必是“单位面积”，观测时间也未必是“单位时间”，不过这些小小变通相信是难不倒读者的。

真正困难的是那“理想条件”四个字。要想切实做到这四个字，必须保证在那个“单位时间”里入射到“单位面积”上的阳光完全被水吸收，一点都不损失，而且还要保证那是水与外界唯一的能量交换。这两点要想切实做好显然都是很困难的。在历史上，最早测定太阳常数的是法国物理学家普耶特（Claude Pouillet，1791—1868）和英国天文学家赫歇耳[7]（John Herschel，1792—1871）。1837年，他们两人彼此独立地进行了实验。“太阳常数”这一名称就是普耶特所取的。为了尽可能接近“理想条件”，普耶特（图7.3）和赫歇耳都做了一些努力，但效果并不理想，因为有一个因素在当时的条件下是无论如何也没法消除的，那就是地球大气对阳光的吸收和反射。这一因素不仅没法消除，甚至还会随时间、地点、阳光倾角、天气条件等因素的不同而不同，连校正都很困难。由于这种因素的干扰，普耶特测得的太阳常数只有正确值的一半左右，赫

歇耳的稍大些，但也强不了太多。

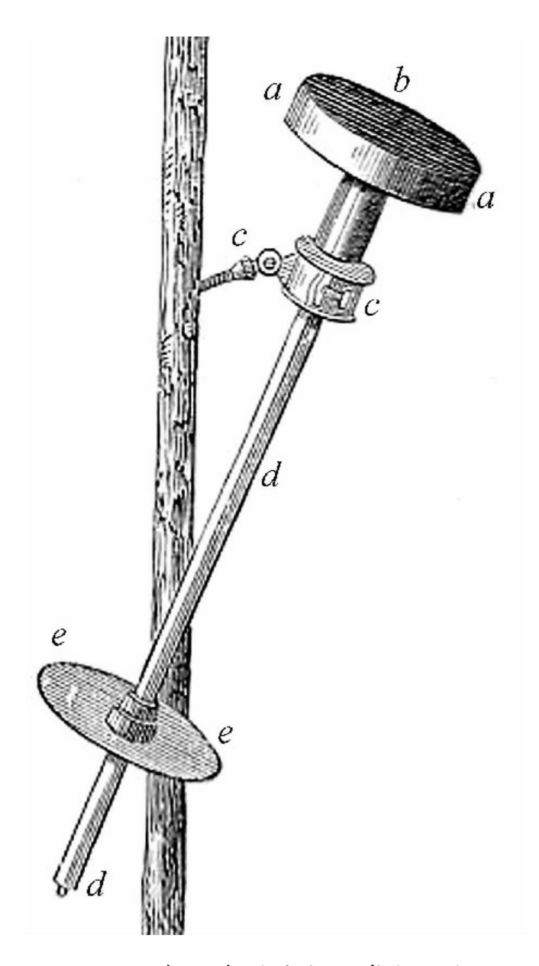


图7.3　普耶特测量太阳常数的仪器

（顺便请读者们思考一个“正大综艺”式的问题：仪器下方的圆盘e是做什么用的？）

为了减少大气干扰，天文学家们想了很多其他办法，比如将观测地点移到高山之巅。但要想真正摆脱地球大气的干扰，只有到外层空间去测量才行，这种“奢侈”的设想随着航天时代的来临成为了可能。从1978年到1998年的20年间，天文学家们利用人造卫星对太阳常数进行了持续测定，结果发现太阳常数约为1366瓦/米^2，由此我们可以推算出太阳的光度约为3.84×10^{26}。3.84×10^{26}瓦是个什么概念呢？它相当于每秒钟爆炸920亿个百万吨级的氢弹！这样一个结果，居然可以从观察自家后院的

一盆水得到粗略的估计，这不禁让人想起一个有关美国物理学家费米（Enrico Fermi，1901—1954）的故事来。1945年，在美国进行第一次核试验时，这位卓越的物理学家只用几张从空中飘落的纸片，就估算出了爆炸的当量（估算结果约为实际值的一半）。这种堪与福尔摩斯相媲美的奇妙推算无疑正是物理学的诸多魅力之一。

不过在这里，我们要提醒读者一点，那就是早在对太阳常数作出精确测定之前，人们就已意识到，所谓太阳常数其实不是一个真正的常数。即便扣除地球大气的干扰及地球离太阳的距离变化等因素，也没有任何物理理由表明太阳常数会是一个真正的常数。太阳常数的大小完全取决于发生在太阳上的物理过程。而再显而易见不过的事情就是，发生在像太阳那样的巨大星球上的物理过程是千变万化的，绝不可能给出一个简单的常数。事实上，对太阳常数的跟踪观测表明，它的数值随时都在变化，既有接近周期性的变化，也有非周期性的变化，不过变化的幅度倒是很小。

好了，现在让我们进入本次自助游的最后一站：推算太阳的表面温度（以下简称温度）。太阳很热是凡地球人都知道的事实，“赤日炎炎似火烧”嘛。但到底有多“热”呢，仅仅靠形容词是不够的，温度才是硬道理。因此很多天文学家都想知道太阳的温度。事实上，测定太阳常数的一个早期动机就是想推算太阳的温度。可惜的是，人们早期测定的太阳常数及由此推算出的太阳光度虽与现代值相距不远（起码在同一数量级上），但将它们与温度联系起来的理论基础却一直空缺着，这种理论“真空”导致了一片混乱的局面。拿推算温度的手法来说，可谓是五花八门，从子虚乌有的“热力线”（heat-ray）到并不适用的牛顿冷却定律（Newton's Law of Cooling），不一而足。拿推算结果来讲，从一千多度到几百万度，天差地别、应有尽有。为了鼓励可靠的研究，1876年，

法国巴黎科学院（Paris Academy of Sciences）特意为推算太阳温度设了一个奖，可惜还是无济于事，那奖被法国物理学家瓦耳勒（Jules Violle，1841-1923）以一个很不靠谱的1 500～2 500°C的推算所获得。

对太阳温度进行推算的理论基础直到1879和1884年，才先由奥地利物理学家斯特藩（Joseph Stefan，1835—1893）从实验数据中得到，后由其同胞玻尔兹曼（Ludwig Boltzmann，1844—1906）从热力学上推出。他们发现，一个黑体在单位面积上的辐射功率（即每秒钟辐射出的能量）正比于绝对温度的四次方。这一定律如今被称为斯特藩-玻尔兹曼定律（Stefan-Boltzmann law），其中的比例系数则被称为斯特藩-玻尔兹曼常数（Stefan-Boltzmann constant）。在国际单位制下，斯特藩-玻尔兹曼常数的数值为5.67×10^{-8}（量纲仍留给读者自己去推导）。斯特藩-玻尔兹曼定律虽然针对的是黑体，但恒星辐射大都比较接近黑体辐射，因此该定律对恒星辐射也近似适用。有了这一定律，推算太阳的表面温度就有了理论基础。推算的方法很简单：（绝对温标下）表面温度的四次方乘上斯特藩-玻尔兹曼常数就是太阳表面每平方米的辐射功率，再乘上太阳的表面积，就是太阳的总辐射功率（即每秒钟辐射出的总能量），也就是我们前面刚刚推算过的太阳的光度。由此不难得到——请读者们“自助”完成——太阳的表面温度（确切地说是光球层的有效温度）约为5 800 K（K为绝对温标的温度单位，摄氏温标的0°C约为273 K，本系列今后若提到温度而不注明温标，指的都是K）。



奥地利物理学家斯特藩（1835—1893）

除上面这种方法外，我们再介绍一种虽然比较粗糙，但却别有趣味的方法。在上面的推算中，除用到斯特藩-玻尔兹曼定律外，还需要知道斯特藩-玻尔兹曼常数的数值，以及太阳的光度。但事实上，只要有斯特藩-玻尔兹曼定律所给出的四次方关系，即便不知道斯特藩-玻尔兹曼常数的大小，甚至不知道太阳的光度，我们依然能推算出太阳的表面温度。方法很简单：我们知道，地球表面的平均温度约为290 K（即17°C——这是对地域和时间的双重平均），虽然很容易被忽略，但这样温度的星球也会向外辐射能量，而且这个能量也可以近似地用斯特藩-玻尔兹曼定律来描述。由于不能像太阳那样自己发光，地球表面的能量主要来自阳光。[8]因此地球能维持目前的表面温度，说明它向外辐射的能量与它所接收的阳光能量基本相等。利用这一关系，我们就可以推算出太阳的表面温度。推算的过程很简单，读者不妨自己试试，您将会发现，斯特藩-玻尔兹曼常数在推算过程中会自动消去，推算的结果约为6 000 K，虽不如前面的方法精确，却也相差不远。

这个方法的趣味之处就在于它是利用行星的温度来反推恒星的温度。但更有趣的是，将它反过来用，我们也可以由恒星的温度来推算出一定距离外的行星温度。这一特点常被天文学家们用来估计恒星周围有可能抚育生命的所谓可栖息带（habitable zone）的位置和宽度。当然，这种推算的局限性是很大的，比如它既要求行星上存在水和大气那样能使温度均匀的东西，又要求那大气不能像金星大气那样富含温室效应气体。

自此我们就圆满完成了本次自助游的全部目标，即本章标题所宣称的推算太阳的质量、光度和表面温度。在“游戏结束”之前，我们再派发一个小红包——介绍一下太阳的光谱类型。在斯特藩-玻尔兹曼定律问世之后不久，德国物理学家维恩（Wilhelm Wien，1864—1928）用热力

学方法证明了一个定律，叫做维恩位移定律（Wien's displacement law）。这一定律表明，表面温度越高的物体，其光谱分布就越往短波方向偏移，表现在颜色上则是往蓝色方向偏移。利用这一特点，天文学家们将恒星依照光谱特征分为了七个大类，分别标记为0，B，A，F，G，K，M。其中O型天体为蓝色，表面温度最高，在33 000 K以上，M型天体为红色，表面温度最低，在3 700 K以下。像太阳这样的黄色天体为G型，表面温度在5 200～6 000 K之间。在每个类型之中，依照温度从高到低的顺序又分出十个亚型，分别用阿拉伯数字0～9来表示，0表示温度最高，9表示温度最低。太阳的光谱类型为G2，在G型之中算是温度较高的。[9]

---

[1]按照今天的称呼惯例，第谷·布拉赫应被称为“布拉赫”，就像艾萨克·牛顿被称为“牛顿”，阿尔伯特·爱因斯坦被称为“爱因斯坦”一样。不过在第谷所生活的年代，当地的习惯是用名而非姓作为称呼，因此第谷·布拉赫就被称为了“第谷”，并沿用至今。

[2]在开普勒时代，引力的概念尚未形成。不过开普勒本人倒是很早就猜测过太阳是行星运动的原因。开普勒第三定律的发现使他更坚定了自己的猜测。因为这一定律表明，离太阳越近的行星运动得越快，这种相关性强烈地暗示着行星运动的原因来自太阳。据说开普勒是作出这种猜测的第一人（不过他所猜测的太阳对行星的影响类似于磁力，而不是引力）。

[3]感兴趣的读者可以针对圆周运动这一特例自行证明这一点。当然，就像很多其他经验规律一样，开普勒定律的成立是有条件的，比如要忽略来自其他天体的影响。而且，开普勒第三定律中的那个常数实际上是正比于中心天体及绕其运动的天体的总质量，只有在中心天体的质

量远大于绕其运动的天体的质量时，才可以近似为中心天体的质量。对太阳系的全部行星和卫星而言，这一近似都基本成立。

[4]我们在后文中将会看到，太阳物质的密度分布是极不均匀的，从核心到外层有着天壤之别。

[5]不过这个号称简单的方法需要用到万有引力定律的一个不太简单的推论：那就是质量呈球对称分布的物体在其外部产生的引力相当于全部质量都集中在球心。这个推论在牛顿那个时代是只有牛顿才能证明的独门绝活，直到今天也足以难倒一部分理工科大学生。

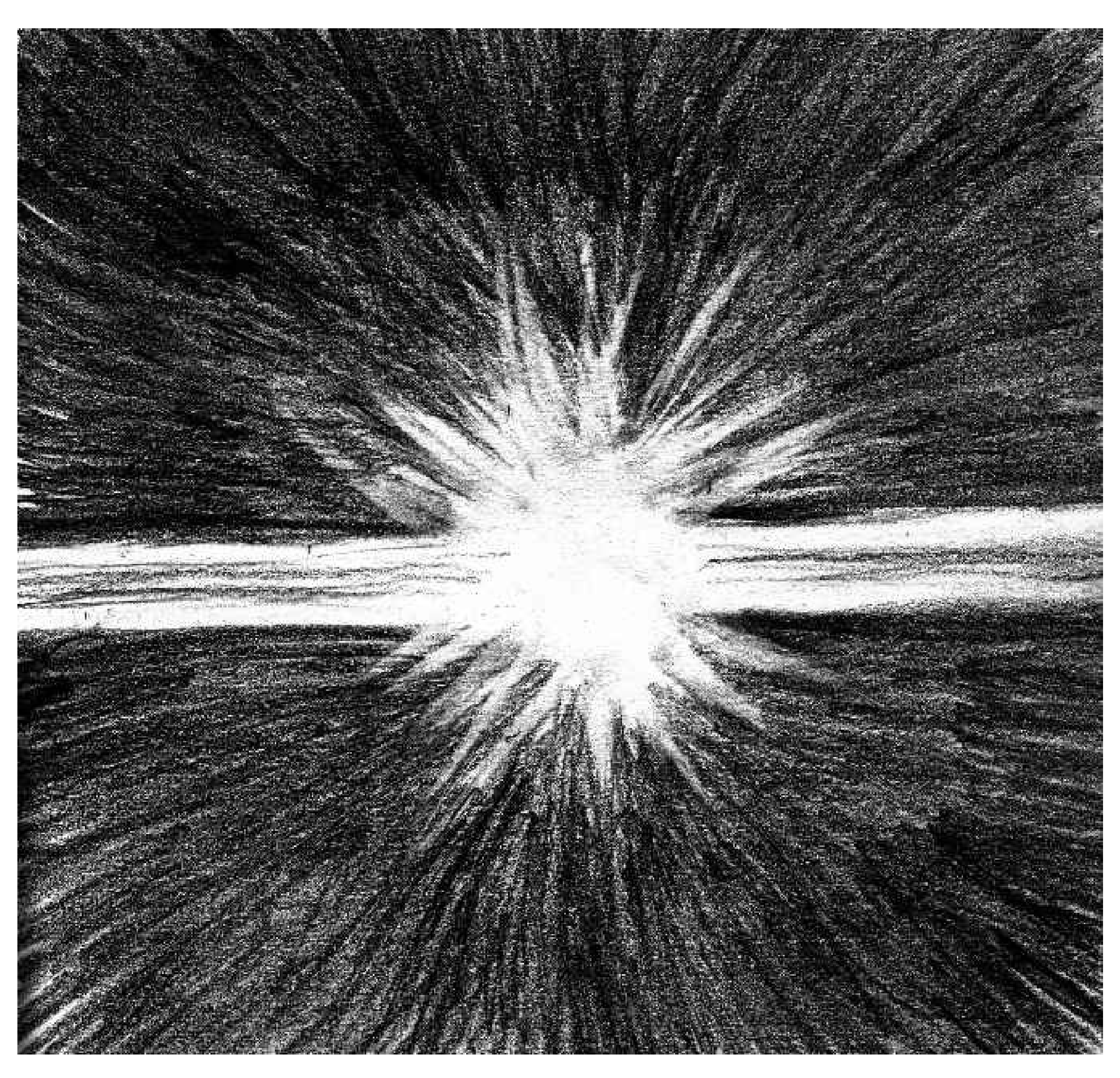
[6]将这一结果与地球的直径联系起来，就可以得到地球的平均密度约为5.5克/厘米^3。若进一步与前面得到的太阳平均密度约为地球平均密度的1/4联系起来，则可以得到太阳的平均密度约为1.4克/厘米^3。

[7]这位赫歇耳通常称为小赫歇耳，他是天王星的发现者、有时称为老赫歇耳的威廉·赫歇耳（William　Herschel，1738—1822）的儿子。说到老赫歇耳，顺便提一下，他也在某种程度上测定过太阳的辐射能量。在1800年所进行的一组观测中，他曾将一个温度计放在太阳光谱的红端以外（他的本意是让那个温度计不被阳光照到，从而可以用来记录环境温度），结果发现记录下来的温度存在反常升高，由此他推断出阳光中存在着波长比红光更长的肉眼无法看见的部分，即红外线。

[8]除阳光外，在地球表面所接受的能量中也有来自地球内部的贡献。不过后者的平均功率只有0.06瓦/米^2，不到阳光能量的万分之一，在我们的计算中可以忽略。

[9]在有些文献中，太阳的光谱类型被标记为G2V，这里的“V”所

表示的不是英文字母“V”，而是罗马数字的“5”，它来自另一种分类细则，所表示的含义是主序星（即壮年的恒星）。



绘画：张京

8　光明的源泉　恐怖的核心

爱因斯坦和他的年轻合作者英费尔德（Leopold　Infeld，1898—1968）曾经写过一本非常出色的科普著作，叫做《物理学的进化》（*The Evolution of Physics*）。在那部著作中，他们作过一个令人印象深刻的比喻，那就是把科学的发展比喻成一个侦探故事。他们这样写道：

> 自从柯南·道尔写出绝妙的故事以来，在几乎所有侦探小说中都有这样一个时刻，侦探收集到了为解决问题的某个阶段所需的全部事实。那些事实往往看起来很奇特、不连贯，并且彼此毫不相干。可是大侦探知道这时不必继续调查了，现在只有纯粹的思维能把搜集到的事实联系起来。于是他拉拉小提琴，或躺在安乐椅上抽抽烟。突然间，老天爷，他找到了联系！他不仅对手头所有的线索都有了解释，而且知道某些其他事情也一定发生了。因为现在他已经确切地知道在哪里可以找到它，如果愿意的话，他可以出去收集他理论的进一步证实。

我们的太阳故事进行到这里，也差不多到了那样一个时刻，可以——甚至必须——像大侦探一样解决一些谜团了。不过与大侦探的单枪匹马及“老天爷，他找到了联系！”那样的戏剧性不同，科学家们收集事实的过程更像是现代侦探连续剧中那些跨省市的联合行动。因为除了大侦探自己收集的事实外，来自同事、同行乃至其他部门的协助往往也对案情的侦破起着关键作用。而科学家们解决谜团的过程，与其说是“拉拉小提琴，或躺在安乐椅上抽抽烟”，不如说更像是现代侦探连续剧中的大型案情分析会。在那样的分析会上，很多人（尤其是新手）会提出很多设想。当那些设想被一一排除后，某位幸运儿（多半是男主人公）

会提出一个真正的好想法。当然，一个精彩的侦探故事往往是曲折的，一个曾经的好想法也许后来又遇到新问题，然后不得不召开新的案情分析会。我们将会看到，科学的发展常常也是如此。

现在就让我们来观摩一场有关太阳的案情分析会，会议的主题是：太阳为什么会发光？或者用更学术一点的话说，恒星的能量产生机制是什么？

太阳为什么会发光？这是一个很古老的问题。既然是很古老的问题，当然曾经有过很古老的回答，比方说“上帝安排的”。但那样的回答就好比是说凶案是上帝做的，不必查了。那样的人做神父远比做侦探合适，我们就不邀请了。[1]

那么，我们所邀请的第一位侦探是谁呢？是英国天文学家赫歇耳（William Herschel，1738—1822）。此人是太阳系第六大行星——天王星——的发现者，在天文史上是一位赫赫有名的前辈。不过我们这场案情分析会虽然打算开成一个“团结的大会”、“奋进的大会”，却不是一个论资排辈的地方。在这个分析会上，赫歇耳的资格虽老，却必须被列入“菜鸟”行列（这也比较符合侦探片中新手总是先发言的惯例），因为他的提议确实是太“菜”了一点。那提议是这样的：太阳之所以发光，是因为它有一个因炽热而发光的大气层，那大气层的下面则有可能是一个凉爽、甚至可能有生命居住的固态表面！

今天的读者也许很难理解，像赫歇耳那样著名的天文学家怎么会想出如此不靠谱的提议？在这里，我们要为赫歇耳说几句公道话，因为他的提议在如今看来虽然极度离奇，在当时却并非单纯的臆想。事实上，赫歇耳之所以作出那样的提议，是因为他注意到了太阳上的黑子，他认为那是透过太阳大气层中的空隙所看到的太阳表面，那表面既然呈现黑

色，想必是凉的，这就是他那提议的依据。那依据虽然是错误的，在当时却不失为是一种可能性。在科学史上，错误的假说可以说是层出不穷，一些反科学人士往往以此为由来抨击科学。其实，科学之所以有今天的声望，从来就不是因为她不会出错，而是因为她不断地寻求实证，并且在这过程之中不断地纠正错误，去芜存菁。我们在后文中将会看到，黑子的“黑”是一种相对的颜色，它并不等于日常意义上的“凉”。我们在第6章中介绍过的太阳光谱的类型也间接证实了太阳“表面”非但不凉，而且要比大气层（确切地说是光球层）更热，因为否则的话，太阳大气层的光谱将会是发射光谱而非吸收光谱（参阅第6章的注释）。除上述误判外，赫歇耳的提议还有一个很大的问题，那就是无论多热的大气层如果得不到能量的补充，都会很快冷却下来，这与太阳长时间稳定地发光是完全矛盾的。[2]

有这么多严重问题，赫歇耳的资格再老，也只能到一旁凉快去了。接下来有两人几乎同时发了言，这两人一位是德国医生兼物理学家迈耶（Julius von Mayer，1814—1878），另一位是苏格兰物理学家沃特斯顿（John Waterston，1811—1883）。说来也巧，这两人不仅发言时间相近，学术经历也相似：他们都在热力学领域中做过一些先驱性的工作，前者研究了热功当量和能量守恒，后者研究了气体分子运动论，但两人的工作都在很大程度上被同时代人所忽略。到了19世纪40年代后期，这对“难兄难弟”又几乎同时对太阳为什么会发光产生了兴趣。与赫歇耳时代不同，当这两人开始研究这一问题时，能量守恒的观念已初步形成（如前所述，迈耶本人就是研究这一观念的先驱之一），因此他们不能像赫歇耳那样随意假设一种近乎静态的发光机制，而必须寻求能让太阳持续发光的能量来源。

作为起点，他们两人都分析了一种土得掉渣的假说，即把太阳当成

一个燃烧的大煤球。这种“煤球说”的提出是不需要想象力的，凡用过煤炉的人都有可能想到，但推翻它却需要一些专业知识。经过计算，迈耶发现太阳虽然大得惊人，但与它那更惊人的光度相比却还不够大，假如太阳果真是个大煤球的话，即便维持燃烧所需的氧气不是问题，它也只能燃烧几千年。沃特斯顿的研究则表明，不仅大煤球烧不了多久，其他化学反应也强不到哪里去，至多能撑20 000年（感兴趣的读者可以利用化学过程所涉及的能量与原子外层电子的能量同一量级这一特点核实一下他们的结果）。如果时光能倒转两百年，他们这些结果将不仅不是问题，反而是天大的优点，因为那跟神学家们“推算”出的世界历史的长度大致相当。但在19世纪中叶，学术界已基本断定地球的年龄远不止那个量级。而依照当时流行的康德-拉普拉斯星云假说（Kant-Laplace nebular hypothesis），太阳和地球是由同一片星云收缩而成的，彼此年龄相近。既然太阳和地球的年龄相近，而地球的年龄远不止几千年，那么只能燃烧几千年的“大煤球”显然不可能是太阳持续发光的能量来源。因此“煤球说”也被排除掉了。

排除了“煤球说”之后，迈耶和沃特斯顿各自提出了自己的假说。迈耶提出太阳之所以持续发光，是因为不断有陨星坠落到太阳上。沃特斯顿则认为是太阳自身引力收缩产生的热量使它持续发光。两者之中，沃特斯顿的“引力说”由于与康德-拉普拉斯星云假说存在共性——即都与引力收缩有关——而占有一定优势。不过优势归优势，两人的论文投寄出去后的命运却是相同的：那就是都被拒掉了——迈耶的论文被巴黎科学院（Paris Academy）所拒，沃特斯顿的则被伦敦皇家学会（Royal Society of London）所拒。但即便如此，沃特斯顿还是找到机会于1853年向英国科学进步协会（British Association for the Advancement of Science）报告了自己的理论，他的报告打动了两位著名人物：德国物理学家亥姆霍兹（Hermann von Helmholtz，1821—1894）和英国物理学家

汤姆孙（William Thomson，1824—1907），即后来的开尔文勋爵（Lord Kelvin）。他们成为了我们这个案情分析会的下两位发言者。

这两人之中，亥姆霍兹的发言很简短，中心思想就是坚决拥护沃特斯顿的“引力说”。汤姆孙则比较健谈，他虽然也表态支持“引力说”，却详细回顾了自己的“心路历程”。他坦承，自己曾经喜欢过迈耶的“陨星说”，但在接触过程中逐渐认清了后者存在的问题，那就是假如太阳系中仍有那么多陨星，我们地球也应该会分到一杯羹，这与地球目前的“冷清”状态显然不符（事实上，考虑到我们这些地球生物的脆弱性，地球若果真分到那“一杯羹”的话，我们早就挂掉了）。不仅如此，假如太阳的巨大能量真的来自陨星，那陨星的数量必须极为庞大，它们的坠落将使太阳的质量增加，进而影响行星的轨道。由此导致的后果之一，是过去几千年中地球的公转周期应该缩短几个星期。这与天文观测显然也是矛盾的。“吾爱‘陨星说’，但吾更爱真理”，面对如此严重的问题，汤姆孙毅然决然地抛弃了“陨星说”，转而投入“引力说”的怀抱。

与“陨星说”相比，“引力说”的确显得高出一筹。亥姆霍兹和汤姆孙的研究表明，太阳的半径只要每年收缩几十米，就足以维持目前的光度（感兴趣的读者不妨自己估算一下，看能否证实他们的结果）。相对于139万千米的太阳直径而言，那样小幅的收缩在当时是任何人都无法察觉的，因而不与观测相矛盾。而且，那样的收缩可以持续几千万年，与汤姆孙本人所估算的地球年龄具有相同的量级。这一点给了他很大的信心，使他在有生之年里保持了对“引力说”的从一而终。若干年后，当人们利用新发现的放射性现象对地球年龄作了重新估算，发现它远比几千万年更古老时，汤姆孙依然固执己见，凭借自己的巨大威望将“引力说”全面推向了20世纪。

但在有关地球年龄越来越铁的证据面前，汤姆孙的威望虽高，终究

只是螳臂挡车。在这一点上，亥姆霍兹醒悟得比较早，他曾表示，如果能发现新能源，我们就可以把太阳的年龄延长。这虽然是一句没什么技术含量的大白话，却也道出了一个努力方向，那就是寻找新能源。只不过“煤球说”所用的化学能（本质上是电磁能）和“引力说”所用的引力能都被排除了，新能源在哪里呢？这个问题自然而然就成为了下一位发言者的主题。

这位发言者是我们的老朋友了，他就是英国天文学家爱丁顿，他的准备工作比前几位发言者都更充分，因为他从兄弟单位那里拉来了以下几项“友情赞助”（赞助者全都是诺贝尔奖得主）：

- 1905年，爱因斯坦提出了著名的质能关系式：$E=mc^2$。它表明在貌似寻常的物质之中蕴藏着惊人的能量。
- 1919年，新西兰物理学家卢瑟福（Ernest Rutherford，1871—1937）在卡文迪许实验室里实现了所谓的人工原子核嬗变（nuclear transmutation），即用人工手段将一种原子核变成另一种原子核。[3]
- 1920年，英国化学家阿斯顿（Francis William Aston，1877—1945）发现了氢原子核（即质子）的质量要比重元素单个核子的平均质量略大。

这几项“赞助”落到爱丁顿那训练有素的大脑里，很快就变成了一个有关新能源的大胆构想：既然原子核可以彼此转变，而质子的质量要比重元素单个核子的平均质量略大，那么只要能把质子聚合成重原子核——比如氦核。前者所包含的多余质量就应该会按照爱因斯坦质能关系式所确定的“汇率”转变为巨大的能量。[4]简单的估算表明，这种被称为核聚变（nuclear fusion）的能量产生机制足以支撑太阳100亿年以上，与

有关地球年龄的所有测定都完全相容。[5]

当然，这只是理论可能性，它能否成为现实，关键得看太阳上的质子是否真能聚合成重原子核。在爱丁顿时代，那还是一个谜，因为核子世界的一个重要成员——中子——尚未被发现，有关核子相互作用的理论也尚未建立起来。不过爱丁顿很乐观，他表示“在卡文迪许实验室里能够做到的事情对于太阳来说应该不会困难”。但他乐观不等于别人也乐观，他的观点一经提出，就遭到了一位重量级英国物理学家金斯（James Jeans，1877—1946）的强力反对。两人互不相让，展开了公开而激烈的争论，他们的争论一度成为皇家学会的一道风景，吸引了很多听不懂他们争论的科学家来看热闹（科学家也是人，他们的好奇心也并不总是集中在大自然上的）。

那么，金斯反对爱丁顿的理由是什么呢？最核心的一条理由是这样的：质子之间存在很强的静电斥力，为了让它们彼此接近到能够发生核聚变的程度，它们的热运动能量必须大到能克服静电斥力的程度，这要求极高的温度，而太阳内部是不可能有那样高的温度的。对此，爱丁顿的回答是：像氦核那样的重原子核的存在是一个既有事实，如果连恒星内部的温度都不够高，那么宇宙中的重原子核从何而来呢？“我们不跟宣称恒星不够热的人争论，我们请他去找一个更热的地方”——他用这样一句掷地有声的名言把球扔回给了金斯。

这球金斯没能接住，因为当时没有人知道更热的地方（不过富有戏剧性的是，后来人们发现，还真的存在一个比恒星内部更热的地方，而且包括氦核在内的某几种重原子核确有相当一部分是在那里被产生出来的。那个地方就是大爆炸初期的宇宙）。爱丁顿虽然把球扔回给了金斯，但要想让别人真正信服，光靠扔皮球是不行的，他必须正面论述自

己理论的可行性。为此，爱丁顿对恒星结构模型进行了研究。在那些具有开创意义的研究中，他估算出太阳核心的温度约为4 000万度，核心物质的密度则为80克/厘米^3（相当于黄金密度的四倍）。由于缺乏核相互作用理论的引导，他无法对核聚变的细节做出可靠描述，但他的估算结果在数量级上是大致成立的。[6]

几千万度的高温，比黄金还高得多的密度，那样的数据看上去有些离奇。但福尔摩斯说得好：当你排除了所有的不可能，剩下的无论看起来多么不可能，一定就是真相。爱丁顿的理论就颇有那样的意味。如果我们对已被排除掉的“煤球说”、“陨星说”和“引力说”分一下类的话，那么从尺度上讲，它们中既有宏观的，也有原子尺度的；从相互作用上讲，则既有电磁的，也有引力的。既然那些都被排除掉了，剩下的尺度就该轮到原子核尺度，而剩下的相互作用则该是弱相互作用和强相互作用了，这正是爱丁顿假说的基本特点。[7]但福尔摩斯的话虽然精彩，毕竟不是金科玉律。爱丁顿的假说真的代表真相吗？这个悬念我们要请下一位发言者来揭晓。那位发言者也做了充分准备，而且拉“赞助”的功夫也不含糊，总计拉到四项之多（赞助者除伽莫夫外，也全都是诺贝尔奖得主）：

- 1928年，俄国物理学家伽莫夫（George Gamow，1904—1968）发现了量子力学的隧道效应，即微观粒子有一定概率穿越经典意义上不可穿越的“障碍”。这一发现在很大程度上破解了金斯的诘难，因为即便太阳核心不够热，依然有一部分质子可以通过隧道效应来克服静电斥力造成的“障碍”。
- 1932年，英国物理学家查德维克（James Chadwick，1891—1974）发现了中子，为理解原子核结构铺平了道路。[8]
- 1934年，意大利物理学家费米（Enrico Fermi，1901—1954）提出

弱相互作用的四费米子理论（four-fermion theory），为近似描述核子反应中的弱相互作用部分提供了理论基础。

- 1935年，日本物理学家汤川秀树（Hideki Yukawa，1907—1981）提出了强相互作用的介子理论，为近似描述核子反应中的强相互作用部分提供了理论基础。

有了上述“赞助”，我们的发言者很快就拟定了一份出色的发言稿，为爱丁顿的假说提供了决定性的支持。这位发言者是20世纪30年代从纳粹德国逃往美国的许许多多物理学家中的一员，他的名字叫做贝特（Hans Bethe，1906-2005）。在贝特开始研究恒星能量产生机制时，对这一问题感兴趣的物理学家已经不少，其中包括后来的美国原子弹之父奥本海默（Robert Oppenheimer，1904—1967）、美国氢弹之父泰勒（Edward Teller，1908—2003），以及著名的苏联物理学家朗道（Lev Landau，1908—1968）。不过贝特并不是一个人在战斗，他有合作者，此人名叫克里奇菲尔德（Charles Critchfield，1910—1994），是一位研究生，在与贝特合作前曾跟随伽莫夫学习。

1938年，在伽莫夫的建议下，克里奇菲尔德研究了质子与质子之间的核反应。在得知贝特也在从事类似的研究后，伽莫夫让克里奇菲尔德把论文寄给贝特，由此促成了两人的合作。贝特和克里奇菲尔德的合作揭示了发生在太阳内部最重要的核聚变反应，即所谓“质子-质子链”（proton-proton chain，简称pp链）的具体实现方式。这种实现方式中最主要的一类被称为第一类质子-质子链（简称ppI链），如彩图7所示。它是这样进行的：

（1）两个质子p聚合成氢的同位素氘核^{2}H（左上角数字表示核子数，下同）。

（2）一个氘核^{2}H与一个质子p聚合成氦的同位素^{3}He。

（3）两个^{3}He通过扔掉两个多余质子p而聚合成一个标准氦核^{4}He。

这整个过程释放出的能量约为26.7 MeV（MeV为百万电子伏特，是描述核反应能量的常用单位，约合1.6×10^{-13}焦耳），其效率是普通化学反应的几百万倍以上。在太阳核心所产生的能量中，这类质子-质子链的贡献占了约85%，是当之无愧的产能大户。[9]

除质子-质子链外，贝特还研究提出了另一种恒星核反应机制，称为碳氮氧循环（CNO cycle），也称为碳氮循环（CN cycle），因为参与该反应的氧核是^{15}O，而不是最常见的^{16}O。这种反应所需的温度比质子-质子链更高，在像太阳这样的小质量恒星的能量产出中只占了1%左右。但它在质量比太阳大30%以上的恒星中却占据着主导作用，因而在恒星核物理中的总体重要性不亚于质子-质子链。与贝特几乎同时，德国物理学家魏茨泽克（Carl von Weizsäcker，1912—2007）也独立地完成了同样的工作。魏茨泽克也是当时这一领域的主要研究者之一，并且正是受到他的影响，贝特才将自己的研究方向由单纯的核物理转到恒星核物理上。1939年，贝特写了一篇综述性的论文，对恒星能量产生机制作了比较完整的阐述。也许是由于对质子-质子链和碳氮循环这两类反应同时作出重要贡献的缘故，贝特成为了1967年度诺贝尔物理学奖的唯一得奖人，得奖理由中很重要的一条就是发现恒星能量产生机制。

在研究恒星能量产生机制的同时，人们对爱丁顿的太阳模型也进行了修正。其中最重要的修正是关于核心温度的，那温度虽仍是一个很难用日常指标来衡量的恐怖数字，但因为有隧道效应的帮助，比爱丁顿所估计的4 000万度要低得多，约为1 570万度。这个温度的重估是十分必

要的，因为核聚变反应的剧烈程度与温度有着极为敏感的依赖性：温度越高，核聚变反应越剧烈。如果太阳的核心温度果真有4 000万度，整个太阳将会像一个超级氢弹一样，在惊天大爆炸中化为灰烬（我们的命运自然也可想而知）。与核心温度的调低相反，重新估计后的太阳核心密度则比爱丁顿的估计更高，约为160克/厘米^3，而太阳的核心压强也极为惊人，达到2 500亿个大气压。这些数字的可怕之处一般人可能难以体会，我们可以举两个例子：维持在太阳核心温度上的物质，哪怕只有玻璃弹珠那样一小块，也足以熔化几百千米以外的钢铁；[10]而太阳的核心压强，则相当于在手指甲那样的面积上压上几亿吨的重物。可以毫不夸张地说，太阳核心这个太阳系的光明源泉，是一个不折不扣的恐怖核心。

好了，现在我们终于有了一个理论，像大侦探的理论一样，能对手头的线索（比如太阳的光度及维持这一光度的漫长时间）作出解释。从某种意义上讲，爱丁顿和贝特是幸运的，因为当爱丁顿开始思考恒星能量产生机制时，人们对物理世界的了解已经深入到了理解这一问题所必需的原子核尺度上，爱因斯坦也已经提出了质能关系式；而当贝特开始研究恒星能量产生机制的细节时，人们已经有了关于核子相互作用的初步理论。那些理论若是不存在，爱丁顿和贝特就是再高明十倍，恐怕也将会“巧妇难为无米之炊”。我有时会想，如果某个遥远星球上存在着其他智慧生物，他们会如何理解这个世界，我们称之为科学的东西在他们那里会以一种什么样的顺序发展呢？那是我心中有关他们的最大好奇。至于他们长什么样？能活多少岁？对我来说倒是细枝末节。

最后让我们再回到本章开头所引的爱因斯坦和英费尔德的文字中来。有读者可能会问：爱丁顿和贝特等人的理论虽然给出了太阳的能量产生机制，但那恐怖核心却是一个我们永远也不可能到达的地方，我们

有什么办法来检验他们的理论呢？答案是：通过检验理论的推论。事实上，我们很快将会看到，由爱丁顿和贝特等人提出的这个恒星能量产生机制的确很像爱因斯坦和英费尔德所说的大侦探的理论，它不仅解释了我们手头的线索，而且也预言了某些其他事情一定已经发生。我们下一步要做的，就是去验证那些事情，收集有关我们理论的进一步证据。

但出乎意料的是，我们信心满满的收集行动却遇到了非常棘手的困难。大自然似乎嫌我们这个侦探故事还不够离奇曲折，而决心要为我们增添一些新的情节。在第9章中，我们将一同去面对那些困难，同时欣赏一下大自然为我们增添的新情节。

---

[1]值得一提的是，在很古老的回答中也有相对不错的。比如公元前5世纪的古希腊先贤阿那克萨哥拉（Anaxagoras，公元前500—前428）曾经设想太阳是一个烧红的大铁球。理由是他亲眼目睹过如火球般从天而降的陨铁，他认为那是太阳的碎片。他这个提议当然也很“菜”，但起码与赫歇耳的提议有一拼。

[2]不过这一点也不能用来苛求赫歇耳，因为能量守恒定律的确立是赫歇耳去世之后的事情（在那之前只有一些关于机械能的粗糙概念）。如今连小学生都会追问的热能从何而来的问题，在赫歇耳时代并不是显而易见的。

[3]卢瑟福最早实现的人工原子核嬗变是用α粒子（即氦核^{4}He）轰击氮核^{14}N，从中产生出氧的同位素^{17}O（同时发射出一个质子）。在那之前的1901年，卢瑟福与他的同事索迪（Frederick Soddy，1877—1956）还共同发现了原子核的自然嬗变。

[4]除这一构想外，爱丁顿还提出过一个更大胆的想法，那就是让电子和质子彼此湮灭，使它们的质量完全转变为能量。那种过程如果可能的话，将比核聚变更强大。可惜（更恰当地说是幸运）的是，那种过程是不可能发生的，因为否则的话，整个物质世界都将因电子和质子的湮灭而崩溃。而且如果恒星的能量果真来源于湮灭过程的话，将不会留下任何残骸，这与当时已经发现的作为恒星残骸而存在的白矮星相矛盾。因此爱丁顿的那个想法很快就被放弃了。不过有意思的是，几年之后，英国物理学家狄拉克（Paul Dirac，1902—1984）出于不同的理由又重蹈了一次覆辙。

[5]需要指出的是，核聚变能够释放巨大能量的想法早在阿斯顿发现氢原子核的质量要比重元素单个核子的平均质量略大的同一年，就由法国物理学家佩林（Jean Perrin，1870—1942）提出过。另外要指出的是，由于中子尚未被发现，在爱丁顿等人的早期设想中需要把一些电子塞进原子核里，以中和一部分质子电荷。

[6]除估计太阳核心的温度、密度等参数外，爱丁顿还分析了恒星质量与光度之间的关系，并对著名的赫罗图作出了定性解释。那些工作对于人们接受他的观点起了很大的促进作用。

[7]严格地讲，爱丁顿的假说并不是具有这些特点的唯一假说。在1896年法国物理学家贝克勒尔（Henri Becquerel，1852—1908）发现放射性现象之后，曾有人猜测太阳的能量来自重核裂变成轻核的核裂变反应。不过人们很快就意识到太阳上没有足够多的重元素来长期提供裂变能量，因此那个猜测很快就被推翻了。

[8]值得一提的是，卢瑟福早在1921就猜测过中子的存在，用以解释原子核的稳定性（在原先的理论中，原子核是由质子和电子构成的，

它面临的一个很棘手的困难，就是禁锢在原子核中的电子的能级远高于实验观测到的核能级）。

[9]质子–质子链中的其他几类实现方式与第一类的区别在于^{3}He生成^{4}He的方式各不相同。对太阳来说，那另外几类实现方式对总能量的贡献约为14%。

[10]这是假定那一小块物质的温度始终维持在太阳的核心温度上。只有那样，它才能熔化几百千米外的钢铁。如果我们仅仅是从太阳核心挖出一小块物质，它的温度会因辐射能量而急剧降低，情形将很不相同。



绘画：张京

9　细小的粒子　巨大的谜团

在第8章中，我们介绍了作为太阳能量产生机制的爱丁顿和贝特的理论（以下简称恒星核聚变理论），它能很好地说明太阳为什么可以长时间发射如此惊人的能量，而且它是能够说明这一现象的唯一理论。从这个意义上讲，它已经经受住了初步的观测检验。但这种检验毕竟是很间接的，如果打个比方的话，有点像是通过测量一个黑箱的输出功能来检验有关它内部结构的猜测，哪怕检验合格，也未必能让所有人都信服，因为它终究不如打开黑箱直接窥视里面的结构来得确切。

科学家们想要的正是像打开黑箱直接窥视那样的确切性。

粗看起来，这胃口似乎有点贪婪，谁能打开一只被2　500亿个大气压所包围着的，具有1　570万度高温的黑箱呢？但幸运的是，在这貌似不可能的任务上，大自然却很慷慨地为我们准备了一扇窗户——一扇能让我们直接窥视太阳核心奥秘的窗户。

只不过窥视的结果却让科学家们足足困惑了30年。

我们先来说说那扇“窗户”。我们知道，普通的窗户之所以能让我们窥视东西，是因为它能让光子通过，而我们的眼睛或仪器则通过接收那些光子来获取信息。太阳核心既然是太阳系的光明源泉，发射光子自然是分内之事，而我们在地球上能见到阳光，说明我们能接收来自太阳的光子。既然一个能发射，一个能接收，粗看起来，那扇能让我们窥视太阳核心奥秘的窗户就是普通的窗户。可惜那只是错觉。我们在后文中将会看到，由太阳核心所发射的光子要经历十几万年的漫长时间才能到达

太阳表面，这个过程比唐僧取经还要艰难无数倍，而且到达太阳表面，继而抵达我们眼睛或仪器的早已不是由核聚变反应所产生的那些光子，而是不知多少代之后的“子孙”了。那样的光子虽仍能如第6章所说的那样带给了我们大量的信息，但此光子非彼光子，有关太阳核心的信息早就丧失殆尽了。

因此能让我们窥视太阳核心奥秘的窗户并不是普通的窗户，尤其光子并不是能让我们窥视太阳核心奥秘的东西。那么能使我们透过那扇窗户窥视太阳核心奥秘的究竟是什么东西呢？这还得从那些核聚变反应说起。

我们介绍过，那些核聚变反应中被称为“第一类质子-质子链”的反应提供了约85%的太阳能量，而那个核反应的第一步是“两个质子聚合成氢的同位素氘核^{2}H”。细心的读者也许早已注意到了，那样的反应其实是不可能发生的，因为反应前后的电荷数目不同：两个质子带两个单位的正电荷，而一个氘核却只带一个单位的正电荷。那样的反应如果发生的话，现代物理学中最可靠的守恒定律之一——电荷守恒定律——就泡汤了。很明显，“两个质子聚合成氢的同位素氘核^{2}H”那样的简略提法只关注了反应过程中的原子核部分，而忽略了反应产物中必须包含的另一个带正电的粒子。那个粒子叫做正电子，它是电子的反粒子，它的出现保证了电荷守恒。

但这还不够，因为有一样重要性不在电荷之下的东西还不守恒，那就是能量。只不过这一点不是仅凭细心就可以发现的，而必须通过实验。但早在那样的实验成为现实之前的20世纪20年代末，物理学家们就已经注意到了在与之类似——即反应产物中有一个电子或正电子——的核反应过程中能量似乎是不守恒的。[1]由于当时刚刚经历了量子力学革

命，物理学家们心中的“革命意识”还比较高涨，遇到那样的异常现象，有些人就开始往物理学革命的路数上去想，其中包括著名的丹麦物理学家玻尔（Niels Bohr，1885—1962），他一度猜测能量守恒定律在原子核尺度上将不再适用。他的这种“冒进”想法遭到了奥地利物理学家泡利（Wolfgang Pauli，1900—1958）的批评。1930年，泡利提出了一个不同的想法。他认为貌似不守恒的那部分能量其实是被一种尚未被观测到的细小的中性粒子带走了。那种中性粒子起初被称为“中子”，后因该名称被一种大质量的中性粒子——即我们如今所说的中子——所霸占而改称为了中微子（neutrino）。在“两个质子聚合成氢的同位素氘核^{2}H”这一反应中，如果把中微子和正电子一起加入到反应产物中去，电荷与能量就都守恒了。

这个由泡利提出的中微子就是使我们能透过那扇窗户窥视太阳核心奥秘的家伙。

中微子这个细小的家伙为什么有那样的神通呢？原因很简单：因为它与物质的相互作用极其微弱。事实上，在主宰微观世界的三大相互作用中，它只参与其中最弱的一种，即所谓的弱相互作用。相互作用微弱所导致的一个直接后果，就是穿透能力超强。在物理实验室里，人们常常用铅来屏蔽辐射，但中微子却可以不太困难地穿越整整一光年厚的铅。正因为有如此超强的穿透能力，它才能在早年的实验中携带能量轻松逃离，给物理学家们留下一个能量不守恒的犯罪现场，甚至让玻尔那样的“神探”都栽了跟斗。[2]也正因为有如此超强的穿透能力，它才可以取代光子成为我们窥视太阳核心奥秘的工具，因为厚达70万千米，让光子举步维艰的太阳物质对它来说几乎是完全透明的。

窗户既然开启了，那么接下来的问题就是：透过这扇窗户，我们想

窥视什么样的奥秘？在这方面，科学家们的胃口倒并不贪婪——起码到目前为止还并不贪婪，他们只想确认太阳的核心是不是真的如恒星核聚变理论所预言的那样发生着大规模的核聚变反应。确认的方法就是探测核聚变反应中必然会产生的那些中微子，即所谓的太阳中微子（solar neutrino），因为那是唯一一种能几乎不受阻碍地逃离太阳核心的粒子。

在介绍那些探测之前，让我们首先估计一下，假如恒星核聚变理论成立，太阳每秒钟会产生多少个中微子？这个估计并不困难，因为太阳上的核聚变反应虽然有很多类型，最终结果却都是将四个质子和两个电子结合成一个氦原子核，[3]每个这样的结合过程都将发射两个中微子（感兴趣的读者不妨以第一类质子-质子链为例自己清点一下数目）。简单的比较表明，四个质子和两个电子的总质量比一个氦原子核大了26.7MeV（约合4.27×10^{-12}焦耳）。这表明太阳核心每产生26.7 MeV的能量，就会发射两个中微子。由于我们在第7章中已经知道太阳的光度约为3.84×10^{29}瓦，即每秒产生3.84×10^{29}焦耳的能量。由此不难算出太阳每秒发射的中微子数量约为1.8×10^{38}。[4]这是一个什么概念呢？它相当于每秒——不分白天黑夜——都会有几百亿个中微子穿过你身上每平方厘米的面积！这就是爱丁顿和贝特等人的这个恒星核聚变理论所预言，而我们将要去搜集证据加以验证的“某些其他事情”。不过大家不必为这个巨大的数字而担心，虽然你一生都会“沐浴”在汹涌的中微子洪流中，却很可能一生都不会有一个中微子与你发生任何相互作用——当然，微不足道的万有引力除外。

数量如此巨大的中微子在地球附近除了来自太阳核心的核聚变反应外，再没有第二种可能了，因此只要能从实验上证实它们的存在及数量，就将是对恒星核聚变理论的判决性支持。但问题是，要想从实验上

证实中微子的存在，必须让它们在我们的探测器里留下踪迹。可中微子既然能穿透整个太阳，穿透整整一光年的铅，当然也能不留丝毫踪迹地穿透我们的探测器。它的这种超强的穿透力既是为我们提供信息的前提，同时却也是对实验技术的最大挑战。

但物理学家们还是有办法的。办法很简单，那就是“人海战术”，这其实是对付小概率事件的通用办法。我们知道，让一个人掷30次硬币要想全都掷出正面几乎是不可能的（概率只有十亿分之一），但如果让全中国十几亿人每人都掷30次硬币，那么一轮下来就会有很大的概率出现一个掷出30次正面的人，这就是“人海战术”的威力。科学家们对付中微子的办法也是如此，只不过是把“人”换成物质。中微子与物质的相互作用虽然微弱，但只要有合适的探测物质，并且数量足够多，当大量的中微子与它们擦身而过时，还是会有个别中微子留下踪迹的。

那么什么样的物质适合做探测物质呢？1946年，出生于意大利的核物理学家庞蒂科夫（Bruno Pontecorvo，1913—1993）研究了这个问题。他提出了探测物质所应具备的一系列条件，其中包括：

（1）不太昂贵——因为所需数量很大，太昂贵了负担不起。

（2）与中微子反应后必须生成放射性元素，以便我们能通过放射性来判定它们的存在，进而推断反应的发生。

（3）所生成的放射性元素必须有合适的半衰期，以便我们既有时间分离它们，又不必等太久来判定它们的存在。

（4）除中微子外，其他因素造成同样反应的可能性必须很小，以免干扰结果。

在这样一些条件下，庞蒂科夫推荐了几种探测物质，其中最重要的一种是氯（Chlorine）的同位素^{37}Cl。它与中微子反应后会生成氩（Argon）的同位素^{37}Ar（同时放出一个电子以平衡电荷）。^{37}Ar是一种放射性元素，半衰期约为35天。

20世纪50年代，美国物理学家戴维斯（Raymond Davis，Jr.，1914—2006）率先展开了这方面的实验研究。考虑到氯在常温常压下是气体，体积过于庞大，戴维斯采用了常温常压下呈液态的四氯化碳（Carbon Tetrachloride，CCl_4）。他的实验室位于地下5米左右，使用的四氯化碳约为3 800升。在这样简陋的条件下，他只能得到一个有关太阳中微子数量的很宽松的上限，比理论值高出了好几个数量级。[5]

结果虽然寒碜，毕竟算是开山之作，戴维斯还是写成一篇论文发了出去。可惜的是，论文在审稿人那里遭到了“温柔一刀”。审稿人在审稿意见中很幽默地指出：像这种缺乏精度的研究，就好比是站在山顶上，用自己的手去碰月亮，然后得出结论说月亮要比自己的手能碰得到的地方更高。审稿人的结论是：这样的研究是不应该写成论文的。

太伤自尊了。

看来必须把实验做大。从20世纪60年代中期开始，戴维斯与美国天体物理学家巴克尔（John Bahcall，1934—2005）合作，开始在美国南达科他州（South Dakota）一座名为Homestake的金矿的矿井里建造一个巨大的中微子探测器（图9.1）。巴克尔是研究太阳模型的专家，他对太阳中微子流量的理论计算，在几乎所有太阳中微子探测实验中都是最重要的参照之一。[6]戴维斯的这个新实验被称为Homestake实验，它的探测器位于地下1 500米深处。这种“深挖洞”的做法是太阳中微子实验中的

标准做法，目的是减少其他因素——比如宇宙线——的干扰。为了便于相互比较，人们往往用等效水深来表示中微子探测器的深度。Homestake实验中的这个1 500米的深度用等效水深来表示大约为4 200米。在Homestake实验中，探测物质是近40万升（约600吨）的四氯乙烯（Tetrachloroethylene，C_2Cl_4）。



图9.1 Homestake探测器

1967年，戴维斯的实验装置基本建成。1968年，他得到了第一批观测结果，但误差很大。直到1970年，经过各种改进，他才得到了具有统计价值（即不至于被误差淹没）的结果。这结果是一个好消息和一个坏消息的混合。好消息是他的确探测到了太阳中微子，坏消息则是他探测

到的中微子流量明显小于理论预言。这个结果催生了一个新名词：太阳中微子问题（solar neutrino problem）。

Homestake实验持续进行了25年（1984年之后改由宾夕法尼亚大学主持），检测到的平均中微子流量约为理论预言的1/3。这是一个令人尴尬的结果，因为尽管检测到的流量只有理论预言的1/3，却依然是一个除恒星核聚变理论外，绝无任何其他机制可以在地球附近产生的巨大流量，从这个意义上讲，它足以作为恒星核聚变理论的铁证。但另一方面，1/3毕竟不是1，连四舍五入都入不到1。它作为定性证实虽然马马虎虎，从定量上讲，却是一个很糟糕的结果。这一点令戴维斯和巴克尔深感不安。自第一批论文发表之后，他们对实验和理论的各个方面都进行了仔细复核，试图缩小观测与理论的差距，却始终无法如愿。1989年，他们在一篇文章中写道："对我们来说很惊讶，也许还相当失望，意识到自那些论文发表以来，尽管对细节进行了十几年的复核及持续改进，却无论在观测还是标准理论上都没什么定性的改变。"

既然自己的努力遇到了挫折，那就看看别人是怎么做的吧。物理学上的任何实验都必须能够重复，而且要尽可能由不同的实验小组、不同的实验设备、不同的实验方法、在不同的地点来重复，这样可以最有效地减少单一小组、单一设备、单一方法所可能存在的从心理因素到系统误差在内的各种不足。这种研究规范是物理学能够令人信赖的一个重要原因。

探测太阳中微子的不同方法其实早在Homestake实验开始运作之前就已经有人在研究了。1966年，俄国物理学家库兹明（Vadim Kuzmin，1937—　）提出了一种新的探测方法，利用镓（Gallium）的同位素^{71}Ga作为探测物质。^{71}Ga与中微子反应后会生成锗（Germanium）的同位

素^{71}Ge（同时放出一个电子以平衡电荷）。^{71}Ge是一种放射性元素，半衰期约为11天。

利用^{71}Ga来探测太阳中微子有一个Homestake实验无法比拟的优势，那就是能够探测到的中微子能量范围要宽广得多。我们在第8章中介绍过，在太阳核心所产生的能量中，第一类质子-质子链的贡献占了85%左右。毫无疑问，这是太阳核心最重要的核聚变反应，也是太阳中微子的最大来源。但这类反应所产生的中微子的最大能量只有0.423 MeV（平均能量为0.267 MeV），而Homestake实验所能探测到的中微子的最低能量——即所谓的阈能（threshold）——却是0.814 MeV，大大高于第一类质子-质子链所产生的中微子的能量。这就意味着Homestake实验对太阳中微子中数量最庞大的那部分是“视而不见”的（当然，那部分中微子在实验与理论对比时是被除去的）。考虑到检测中微子的极端困难性，这种“视而不见”无疑是极大的“浪费”。而利用^{71}Ga来探测太阳中微子的最大好处就是能弥补这一缺陷，因为它所能探测到的中微子的最低能量为0.233 MeV，从而涵盖了很大一部分来自第一类质子-质子链的中微子。[7]除这一点外，利用71Ga来探测太阳中微子还有一个很大的好处，那就是在理论上，人们对第一类质子-质子链的研究要比对那些所占比例小得多的其他反应彻底得多，因而能提供更可靠的理论数据。

设想是有了，将它变为现实却是一件费时费力费钱的事情，利用^{71}Ga作为探测物质的太阳中微子实验直到20世纪90年代初才开始出结果。从事此类实验的有两个研究小组，一个是由苏联和美国的科学家联合进行的，称为SAGE（Soviet-American Gallium Experiment的缩写）实验，地点位于苏联高加索山区（Caucasus mountains）—条四千米深的隧道内，等效水深约为4 700米；另一个是由美、德、法、波兰、意大

利、以色列等国的科学家联合进行的，称为GALLEX（Gallium Experiment的缩写）实验，地点位于意大利阿布鲁佐大区（Abruzzo）一个等效水深约3 200米的地下实验室内（图9.2）。在实验手段上，SAGE采用的实验物质是30吨液态镓（1991年增加到57吨），GALLEX采用的则是101吨三氯化镓（gallium trichloride）溶液。

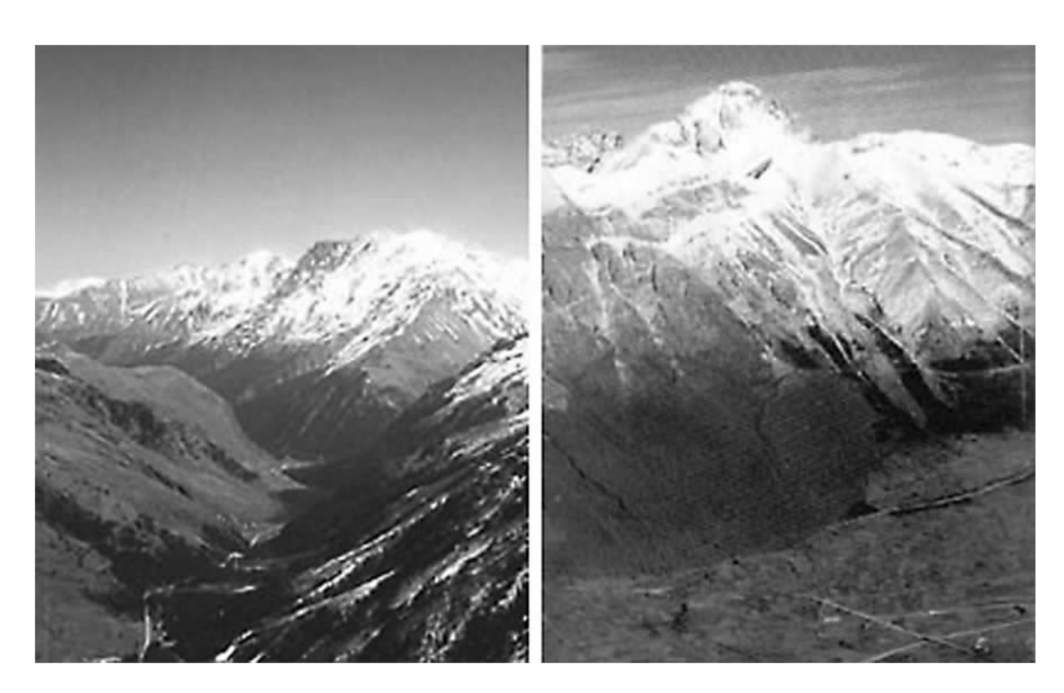


图9.2　SAGE（左）和GALLEX（右）实验所在的山区

那么这两组新实验的结果如何呢？它们是“A.　找到了全部的太阳中微子”呢？还是“B.　证实了Homestake实验那缺斤短两的结果”？答案是：“C.　以上都不对”。这两组新实验探测到的太阳中微子流量既不是1/3，也不是1，而大约是理论流量的60%。[8]

有点盲人摸象的意味了，你摸到一个脑袋，我摸到一条大腿。真相到底如何呢？还得再摸摸看。

另一组“摸象”的“盲人”是日本人，他们的实验结果其实比SAGE和GALLEX出得更早，他们的实验地点在日本神岡町（Kamioka）的一座

等效水深约2 700米的地下矿井内，称为神冈观测站（Kamioka Observatory），原先从事的是一度很热门的质子衰变研究。自1985年开始，该观测站经过扩建后改称为神冈核子衰变实验Ⅱ期（Kamioka NDE-Ⅱ）。自1987年起，该实验室的探测器——神冈探测器——开始进行太阳中微子探测。

神冈探测器探测太阳中微子的方式与Homestake、SAGE、GALLEX等实验都不相同，它核心部位的探测物质是2 142吨高度纯净的水，所利用的反应过程则是中微子与电子的碰撞。这种碰撞当然是小概率事件（因此要用几千吨水），但如果发生了，就有可能使电子获得能量，如果入射中微子的能量很高，电子所获得的能量也会很多，运动速度甚至可以超过光速——别紧张，只是超过水中的光速，没有破坏相对论。人们在电磁学研究中早就知道，当电子在水中的运动速度超过水中的光速时，会发射一种特殊的辐射，叫做切连科夫辐射（Cherenkov radiation）。通过观测这种辐射，物理学家们就可以确定反应的发生。

神冈探测器的这种与众不同的探测原理使它具有一种Homestake、SAGE、GALLEX等实验都不具有的优势，那就是可以确定中微子与电子发生反应的时间、位置、入射方向、入射能量等细节。这些细节对于统计太阳中微子的数量来说虽不是必须的，但对于深入探索太阳核心的其他奥秘却有很大价值。[9]不过有得就有失，神冈探测器也有一个很大的问题，那就是阈能特别高。为了使碰撞后的电子能够“超光速”，并且发射足够强劲的切连科夫辐射，入射中微子的最低能量要达到7.2 MeV，只有“极少数极少数”的太阳中微子能具有如此高的能量。

从1987年到1990年，神冈探测器在积累了1 040天的数据后得到了一个结果：它探测到的太阳中微子流量约为理论流量的46%。1995年，

在积累了2 079天的数据基础上，上述结果被修正为55%。1996年，神冈观测台耗资一亿美元建造了更大的探测器，称为超级神冈（Super-KamiokaNDE）探测器（图9.3），它的探测物质增加到了50 000吨高度纯净的水，它对切连科夫辐射的探测灵敏度达到了可以探测到月亮上一支烛光的惊人程度，而它的阈能则降低到了5.5 MeV。一句话，它在各方面都有了长足的改进。自1998年起，超级神冈探测器开始发布探测结果，它所探测到的太阳中微子流量约为理论流量的47%，与其他各组实验都不相同。

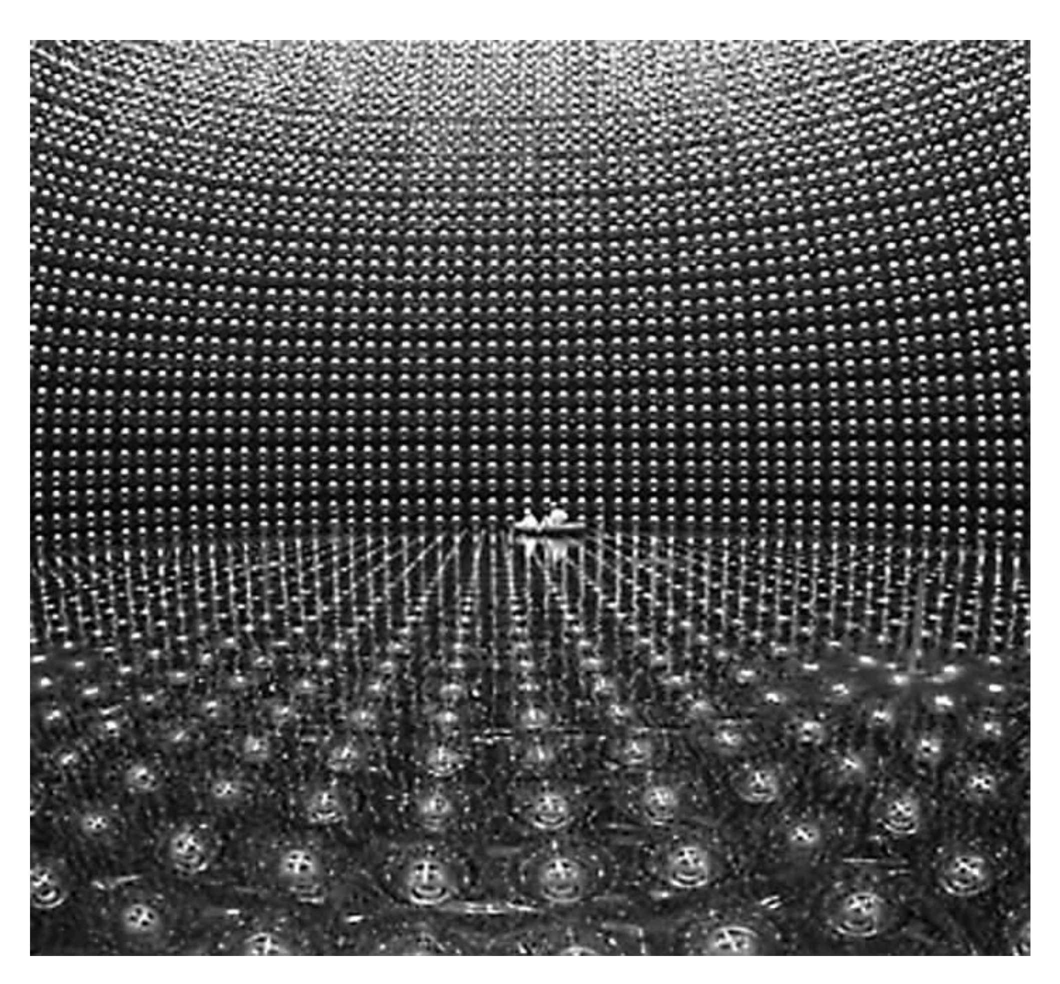


图9.3 超级神探测器

杯具了！

20世纪就在这样忙忙碌碌的太阳中微子研究中走到了尾声。虽然在这类研究中，无论实验还是理论都存在不小的误差，但有一点已经可以确定，那就是探测到的太阳中微子流量明显小于理论预言，而且两者在不同的能量范围内有不同的差距。中微子这个细小的粒子，给即将到来的新世纪留下了一个巨大的谜团。究竟是太阳原本就没有发射那么多中微子呢？还是有些太阳中微子失踪了？如果是失踪，那它们究竟跑到哪里去了呢？

---

[1]这里所说的“反应产物中有一个电子或正电子”的核反应过程是指当时人们正在积极研究的重原子核的β衰变，那种反应过程中的能量异常现象其实更早些时候就被注意到过，但直到20世纪20年代末，随着其他可能性被陆续排除掉，才真正威胁到了能量守恒定律。另外要说明的是，那些实验所导致的只是中微子的提出，包括正电子在内的反粒子概念的提出则是出于其他原因，时间上也更晚一些。

[2]中微子直到1956年才由美国物理学家考恩（Clyde Cowan，1919—1974）、莱因斯（Frederick Reines，1918—1998）等人所发现。莱因斯因此而获得了1995年的诺贝尔物理学奖（考恩不幸已经去世）。

[3]确切地讲，这只是现阶段的主要反应模式。在后文中我们将会看到，当太阳步入“晚年”后情况将会有所变化。另外要说明的是，参与反应的两个电子的参与方式不止有一种：主要的方式是与反应产物中的正电子湮灭；稀有的方式是直接参与反应，那样在反应产物中就不会有正电子（因为电荷已经平衡了）。

[4]这个估算也请读者自己去做。不过要提醒的是，这个估算是有系统误差的，感兴趣的读者请思考一下，什么因素会造成系统误差？它

会使估计出的中微子数量偏大还是偏小？

[5]他所得到的这一上限为40 000 SNU。SNU是所谓的太阳中微子单位（Solar Neutrino Unit），它描述的是中微子探测器探测太阳中微子的能力。一个SNU表示每秒每10^{36}个探测器原子可以俘获一个太阳中微子。

[6]有读者也许会问：我们前面不是已经很轻松地计算出了太阳中微子流量吗？何必还要什么专家呢？答案是：我们计算的只是太阳中微子的总量，对实验探测来说重要的不是总量，而是中微子数目随能量的分布，因为各个探测器所能探测到的中微子能量范围各不相同，在不同能量上的探测灵敏度也各不相同。中微子数目随能量的分布与太阳内部各种核聚变反应的相对比重等各种复杂因素有着密切关系，是非常困难的理论问题。

[7]这一点从两者所能俘获的太阳中微子流量的大小可以看出。Homestake实验所能俘获的理论流量约为8 SNU，而以^{71}Ga为探测物质的探测器所能俘获的理论流量高达130 SNU左右。

[8]由于对太阳中微子流量的理论计算存在几种彼此接近，但互不相同的结果，因此视所用理论结果的不同，不同文献给出的实验与理论的比值存在一定差异。

[9]其他几种探测器之所以做不到这一点，是因为它们反应产物的半衰期长达十几或几十天，等到人们能通过反应产物的衰变来确定反应的发生时，有关反应的细节信息早已不复存在了。



绘画：张京

10　标准太阳模型vs粒子物理标准模型

由太阳中微子带来的这些问题被称为太阳中微子问题（solar neutrino problem），有时也被称为太阳中微子之谜，或太阳中微子失踪之谜。不过严格来说，这最后一个名称是需要论证的，这就好比在现实世界中要把一个案件定性为失踪案，是需要经过排查的。在本章中，我们就从那些排查说起。

我们要排查的第一种可能性是观测出问题的可能性。这种排查之所以必要，是因为中微子是一种相互作用极其微弱，从而在观测上极易“漏网”的粒子。这“漏网”达到一定程度，就有可能无中生有地产生出太阳中微子问题来，就像早年的核物理实验因为无法探测到中微子，而无中生有地闹出了能量不守恒的伪问题来一样。

那么，太阳中微子问题是否也有可能是那样的伪问题呢？答案是否定的。理由有两条：一是太阳中微子问题乃是几组独立实验的共同结果，这种结果的可靠性要比单一实验大得多。二是GALLEX和SAGE这两组实验都用流量已知的人工中微子源对探测器进行过校正，从而进一步确保了它们的可靠性。因此我们有充分的理由相信，太阳中微子问题并不是观测错误导致的伪问题。

既然不是伪问题，那就是真问题了；而既然不是观测问题，那就是理论问题了。因此，接下来要排查的就是哪部分理论出了问题。我们知道，对太阳中微子流量的理论预言来自所谓的太阳模型，这是一种在学术界有着广泛共识的模型，也称为标准太阳模型（standard solar model）。这一模型以太阳的大小、光度、表面温度等可观测数据为约

束，对太阳内部物态的分布、压强的平衡、能量的产生与传输、辐射的吸收与发射等主要因素及相互关系给出了定量描述。它决定着太阳核心产生中微子的机制及数量。但标准太阳模型并不是故事的全部，因为太阳中微子被产生之后还必须经历一个传播环节：它必须穿越几十万千米的太阳物质以及日地之间将近一亿五千万千米的距离，才能进入我们的探测器。而描述这一传播环节的是一个有关粒子物理的模型，那也是一种在学术界有着广泛共识的模型，叫做粒子物理标准模型（standard model of particle physics）。这一模型对目前已知的所有基本粒子及其相互作用作了相当精密的描述。因此，与太阳中微子问题有关的理论其实有两个部分，它们拥有一个共同的名字叫做“标准模型”。而所谓“哪部分理论出了问题”，归根到底是两个标准模型之争，即标准太阳模型粒子物理标准模型。

这两个标准模型哪个更可靠呢？在谜底揭晓之前如果让物理学家们押宝，我想绝大多数物理学家[1]会把宝压在粒子物理标准模型上。因为这个模型自20世纪60年代后期建立以来，已经得到了无数的检验，其中包括所预言的新粒子及其参数得到证实那样堪称经典的检验。粒子物理标准模型所描述的虽然是肉眼无法看见的微观世界，但对物理学家们来说，实验室里数不胜数的粒子反应图片无时无刻不在述说它的实在性。与之相比，标准太阳模型所受到的检验却少得可怜，其中被寄予厚望的太阳中微子实验偏偏又得出了令人尴尬的结果。而且与粒子物理标准模型所描述的相对纯粹的微观世界不同，标准太阳模型涉及的是一个巨型天体的内部世界，只要想想我们脚底下的地球尚且如此复杂，我们对标准太阳模型的信心就很难不打上几分折扣。因此直到20世纪90年代，曾因研究大统一理论而闻名的美国物理学家乔治（Howard Georgi，1947— ）还在一篇论文中宣称太阳中微子问题与粒子物理无关，他并且很体贴地表示：天体物理学家们能够把太阳中微子的数目计算到只差两到

三倍的程度，就已经很了不起了。言下之意，实验与理论的这点出入是不足为奇的，可以由标准太阳模型负全责，别来烦粒子物理。另一位知名的美国物理学家德雷尔（Sidney Drell，1926—　）也表示，粒子物理标准模型已经辉煌到了难以被放弃的程度。

既然“民意”如此，那我们就先考虑标准太阳模型出问题的可能性吧。我们在第8章中提到过，太阳核心核聚变反应的剧烈程度与太阳的核心温度有着极为敏感的依赖性。由于太阳中微子来自于核聚变反应，它的流量当然也与后者的剧烈程度，从而与太阳的核心温度有着极为敏感的依赖性。因此，标准太阳模型出问题的最大可能性，就是它所预言的太阳核心温度出了错。如果太阳核心的实际温度比标准太阳模型所预言的低，那么太阳核心核聚变反应的剧烈程度，以及它所产生的太阳中微子的流量就会大幅降低。计算表明，托太阳核心温度与核聚变反应之间的敏感依赖性的福，太阳的核心温度只要调低几个百分点，就足以使太阳中微子的流量减少几十个百分点，从而与观测结果定性相符。

初看起来，这是一种很大的可能性，因为在描述像太阳核心那样远离经验的环境时，出现几个百分点的温度误差不仅是完全可能的，甚至可以说是无可避免的。但细想一下却又不然，理由很简单：将太阳的核心温度调低几个百分点虽然能定性地调和中微子流量的理论与观测之间的差距，同时却也会导致太阳光度的大幅降低——因为核聚变反应的剧烈程度大幅降低了，而这是与观测完全相悖的。

不过仅凭这一点还难不倒物理学家们，因为有一些方案可以在调低太阳核心温度的同时维持太阳的光度不变。这其中比较拙劣的方案是利用我们在第9章中提到，并将在后文中进一步介绍的“由太阳核心所发射的光子要经历十几万年的漫长时间才能到达太阳表面”这一特点。利用这一特点，有人提出了一个很离奇的假设，那就是太阳的核心温度是在

不久之前才突然变低的，由此导致的效果尚未传到太阳表面，从而尚未影响太阳光度。这个假设的拙劣之处是显而易见的，因为它是为解决太阳中微子问题而特意炮制的，而且它甚至比太阳中微子问题更难理解。这种用一个比原始问题更难理解的假设来解决问题的做法几乎是与科学的宗旨背道而驰的。连这样的“天方夜谭”都被提出来了，可见人们是多么希望把问题归咎于标准太阳模型。

不过，修改标准太阳模型的方案也并不都是拙劣的。相对高明的方案是在调低太阳核心温度的同时扩大核反应区域的范围，以抵消核反应剧烈程度降低造成的影响，从而达到维持光度不变的目的。但不幸的是，我们在第9章中已经介绍过，太阳中微子的总流量是与太阳光度直接对应的。一旦维持太阳光度不变，也就维持了太阳中微子的总流量不变。因此这种方案至多能解释某些特定能量范围——比如高能区——内的太阳中微子问题（因为核心温度的调低会影响各种核聚变反应的相对比例，从而影响不同能量中微子的相对比例——尤其是减少高能中微子的数量）。但随着实验结果所涵盖的能量范围越来越宽，太阳中微子问题早已不仅仅是特定能量范围内的问题，而变成了总流量上的问题，这就超出了维持太阳光度不变的那些方案的解释范围。[2]

但对修改标准太阳模型的方案构成更沉重打击的，则是我们在后文中将要介绍的所谓日震学研究，那种研究证实了标准太阳模型的许多细节，从而为修改标准太阳模型的努力设置了相当苛刻的限制。事实上，标准太阳模型看似“五大三粗”，只用寥寥几个方程式来描述整个太阳的基本特征，但它对物理原理的运用却是相当缜密的，甚至达到了“牵一发动全身”的精密程度。比如要想调低太阳的核心温度，就必须同时调节太阳内部重元素比例之类的参数，那些参数有不少是可以用日震学手段进行检验的，而检验的结果几乎无一例外地支持了标准太阳模型。

除日震学研究外，对标准太阳模型的支持还来自另外一个领域，那个领域不是别的，正是把怀疑目光引向标准太阳模型的太阳中微子研究本身。我们说过，标准太阳模型出问题的最大可能性，就是它所预言的太阳核心温度出了错。之所以这么说，首要原因当然是太阳核心温度与中微子流量有着极为敏感的依赖性，从而在表观上具备解决太阳中微子问题的潜力，但另一方面也是因为我们无法直接测定太阳核心温度，从而无法进行实验裁决。

实验鞭长莫及的地方，往往就是理论遍地开花的地方。

但细心的读者也许还记得，我们在第9章中曾经把中微子表彰为“取代光子成为我们窥视太阳核心奥秘的工具”。既然给予了这么高的荣誉，我们就要问：在它让我们窥视到的“太阳核心奥秘”中，是否包括了太阳的核心温度呢？很幸运，答案是肯定的，就像光谱可以告诉我们发光体的温度一样，太阳中微子的能谱也可以带给我们有关太阳核心温度的信息。这一答案，加上像神岡探测器那样能够测定中微子能量的探测器的问世，使我们可以通过太阳中微子的能谱来推算太阳的核心温度。而推算的结果与标准太阳模型的符合程度远高于修改方案。

自此，修改太阳模型的努力算是撞上了南墙，虽不能说从此无人问津，但希望已变得很渺茫了。而太阳中微子问题也确实可以定性为失踪案了，因为标准太阳模型既然没有问题，就说明太阳中微子的流量确实要比实验探测到的大，一部分太阳中微子确实失踪了。

现在留给我们的就只剩一条路了：修改粒子物理标准模型。粒子物理标准模型再是“辉煌到了难以被放弃的程度”，到了这个地步，我们也只得在它头上动土了。不过在动土之前，我们先要对失踪者——中微子——的家世做一个彻查。据我们目前掌握的情况，中微子家族共有三兄

弟，个个都是偷运能量的好手。我们前面所说的中微子只是最早落网的那个，它的全名叫做电子中微子（electron neutrino）。除电子中微子外，人们在1962年和2000年又先后发现了另外两种中微子，分别叫做μ子中微子（muon neutrino）和τ子中微子（tau neutrino）。[3]这种三兄弟结构为从修改粒子物理标准模型角度解决太阳中微子问题提供了一条重要思路，叫做中微子振荡（neutrino oscillation）。

什么是中微子振荡呢？简单地讲就是中微子三兄弟之间的相互转变——比如电子中微子变为μ子中微子，μ子中微子变为τ子中微子等。这种转变可以循环往复，因而称之为振荡。中微子振荡之所以有可能解决太阳中微子问题，是因为太阳核心所产生的全都是电子中微子，而我们在第9章中介绍过的那些中微子探测器所探测的也主要是电子中微子。[4]因此假如来自太阳核心的电子中微子在飞往地球的途中有一部分转变成了μ子中微子或τ子中微子，就会逃过探测器的检验，而造成中微子失踪的假象。这就好比一位用几个马甲（笔名）轮流发帖的网民，从IP地址上显示他一共发了一百个帖子，但你若只搜索其中一个马甲，就只能搜到一部分帖子。

有关中微子振荡的想法有着不短的历史。事实上，早在中微子的兄弟被发现之前，也早在太阳中微子问题出现之前，就有人提出了中微子振荡的想法，此人就是我们在第9章中提到过的那位出生于意大利的核物理学家庞蒂科夫。1958年，庞蒂科夫提出了中微子和反中微子相互振荡的可能性。[5]在μ子中微子被发现之后，1967年，他与时俱进地修改了自己的猜测，提出电子中微子与μ子中微子也有可能发生振荡。从某种意义上讲，他的这些猜测可以说是预言了太阳中微子问题的出现，因为中微子振荡必然会导致只对电子中微子敏感的中微子探测器无法探测到全部中微子。当戴维斯的Homestake实验让太阳中微子问题粉墨登场

后，庞蒂科夫又与俄国物理学家格里波夫（Vladimir Gribov，1930—1997）一起，在第一时间重申了自己的猜测。

当然，通过修改粒子物理标准模型来解决太阳中微子问题的方案并非只有中微子振荡这一种，只不过其他方案都很短命，比如有一种方案叫做中微子衰变。它认为中微子之所以失踪，不是因为披上了其他马甲，而是半路夭折了。在粒子物理中，粒子的夭折有一个很文雅的名字叫衰变。[6]可惜的是，这种方案在1987年遭到了判决性的否认。那一年，包括神岡探测器在内的几组中微子探测器观测到了一批来自大麦哲伦星云（Large Magellanic Cloud）中的一次超新星爆发——著名的超新星1987A——的反中微子。那些反中微子经过了近17万年的长途跋涉才抵达地球。由于粒子与反粒子有着相同的寿命，如果中微子在从太阳到地球的区区8分20秒时间里就会夭折掉一部分，那我们是绝不可能观测到那么多来自超新星1987A的反中微子的。因此，中微子即便会夭折，也绝不可能那么快地夭折。既然中微子不能那么快地夭折，那就只好让方案本身夭折了。

真正有希望的还是中微子振荡。

那么，中微子振荡需要从哪里入手修改粒子物理标准模型呢？是从添加中微子的质量[7]入手。在粒子物理标准模型中，所有中微子都是无质量的。在理论上可以证明，如果所有中微子都是无质量的，中微子振荡就不可能发生。[8]因此，要想有中微子振荡，就必须从添加中微子质量入手，修改粒子物理标准模型。

接下来我们想知道的是：在中微子振荡中，中微子相互转变的概率满足什么样的规律？因为只有知道了这一点，才能与观测相比较。简单的理论分析表明，中微子相互转变的概率与中微子的质量、能量、相互

间的混合，以及飞行距离等诸多因素都有关联。[9]这些关联不仅为拟合观测数据提供了许多可调节的参数，而且也定性地解释了不同能量的中微子有不同的失踪比例这一现象。就凭这两点，它已经比我们前面提到过的那些方案更有希望了。

可惜那只是表面现象。

后来当人们更细致地研究了中微子振荡之后，却发现了一些问题。比如计算表明，要想用中微子振荡来解释观测结果，需要假定中微子的某些参数与像日地距离那样与中微子风马牛不相及的参数之间满足一定的巧合关系。这种有赖于巧合的解释是物理学家们素来不喜欢的，因此是一个不好的兆头。如果说这还只是口味问题，那另外几个问题可就都是“你死我活”的级别了。比如计算表明，由中微子振荡所导致的中微子失踪率应该呈现明显的季节变化（这是因为中微子相互转变的概率与飞行距离有关，而在不同季节里，日地距离是不同的），但观测却并未发现与理论预期相一致的变化。此外，中微子相互转变的概率与能量有关这一特点虽然定性地符合不同能量的中微子有不同失踪比例这一特点，但在定量上，观测所显示的失踪率与能量的相关性——尤其在高能区——却明显小于理论的预期。

这样一来，情况就又有些不妙了。如果连中微子振荡也行不通，那岂不是连最后一条路也要变成绝路？幸运的是，在中微子振荡中还有一个重要因素起到了“挽狂澜于既倒”的作用，那就是物质对中微子振荡的影响。虽然没有明说，我们前面提到的中微子振荡其实都是指真空中的振荡，但事实上，太阳中微子一出世就得穿越厚达几十万千米的太阳物质，这会对它们产生一定的影响。有读者也许会问：我们在第9章中不是说过，太阳物质对中微子来说几乎是透明的吗？是的，我们曾经说

过。但透明不等于完全没有影响，玻璃对光来说也是透明的，却可以导致各种光学效应。太阳物质对于中微子来说也是如此，虽然透明，但会有一定的影响——尤其是对高能中微子会有一定的影响。而且更重要的是，太阳物质对不同类型的中微子有着不同的影响，对电子中微子的影响要比对μ子中微子和τ子中微子大，由此导致的后果是对中微子振荡——尤其是对高能中微子的振荡——产生影响。这种影响早在1978年，就由美国物理学家沃芬斯坦（Lincoln Wolfenstein，1923— ）研究过。1985年，苏联物理学家米克耶夫（Stanislav Mikheyev）和斯米诺夫（Alexei Smirnov，1951- ）推进了这一研究，并得到了一些重要结果。这种物质对中微子振荡的影响因此而被冠以他们三人的姓氏首字母，称为MSW效应（MSW effect）。后来的定量计算表明，考虑了MSW效应后的中微子振荡与所有的太阳中微子观测都相容，并且是唯一一种与所有观测都相容的解释。

不过，中微子振荡作为太阳中微子问题的正解，它的真正确立则是建立在更直接的实验裁决之上的。这种裁决首先来自日本的超级神岡探测器。1998年，超级神岡探测器通过检测宇宙线在地球大气层中产生的μ子中微子与电子中微子的相对数目，首次直接证实了中微子振荡的存在。[10]在太阳中微子研究中，神岡系列探测器可谓居功至伟，占据了不止一项第一。除首次直接证实中微子振荡外，我们在第9章中提到的它能测定中微子入射方向这一特点（它对中微子振荡的证实也有赖于这一特点），还使它成为了第一个直接证实太阳中微子来自太阳方向的探测器（此前的其他探测器都只能从数量上间接推断中微子来自太阳，因为其他来源都不可能如此巨大）。而在前面提到的对来自超新星1987A的反中微子的探测中，它立的也是头功。

超级神岡探测器虽然证实了中微子振荡的存在，但对于解决太阳中

微子问题来说却还不够一锤定音，因为它在证实中微子振荡时所观测的并不是太阳中微子，而是能量远高于太阳中微子的由宇宙线产生的中微子。

那么，对太阳中微子问题最一锤定音的裁决来自哪里呢？来自加拿大的萨德伯利中微子观测台（Sudbury Neutrino Observatory，SNO），如图10.1所示。这座位于等效水深6 000米处的观测台所用的观测物质是1 000吨重水。这“重水”与超级神岡探测器所用的“水”虽只有一字之差，对于太阳中微子探测来说却有天壤之别。我们知道，水分子是由一个氧原子与两个氢原子组成的，而重水“重”在哪里呢？就“重”在那两个氢原子被换成了氘原子上。氘原子的原子核是由一个质子和一个中子组成的。当中微子与那样的原子核相遇时，有一定的概率会发生所谓的中性流反应（neutral current reaction），其结果是“棒打鸳鸯”——将氘核拆散成单独的质子和中子。与其他探测器所依赖的反应不同，这种中性流反应对三种中微子是完全一视同仁的。因此无论中微子披的是什么马甲，都能被检测到。更妙的是，除中性流反应外，中微子与重水还可以发生其他类型的反应，那些反应则与其他探测器一样，只对电子中微子敏感。[11]因此，萨德伯利中微子观测台可以在测定中微子总流量的同时确定电子中微子的比例，从而既验证标准太阳模型的预言，又检验中微子振荡。

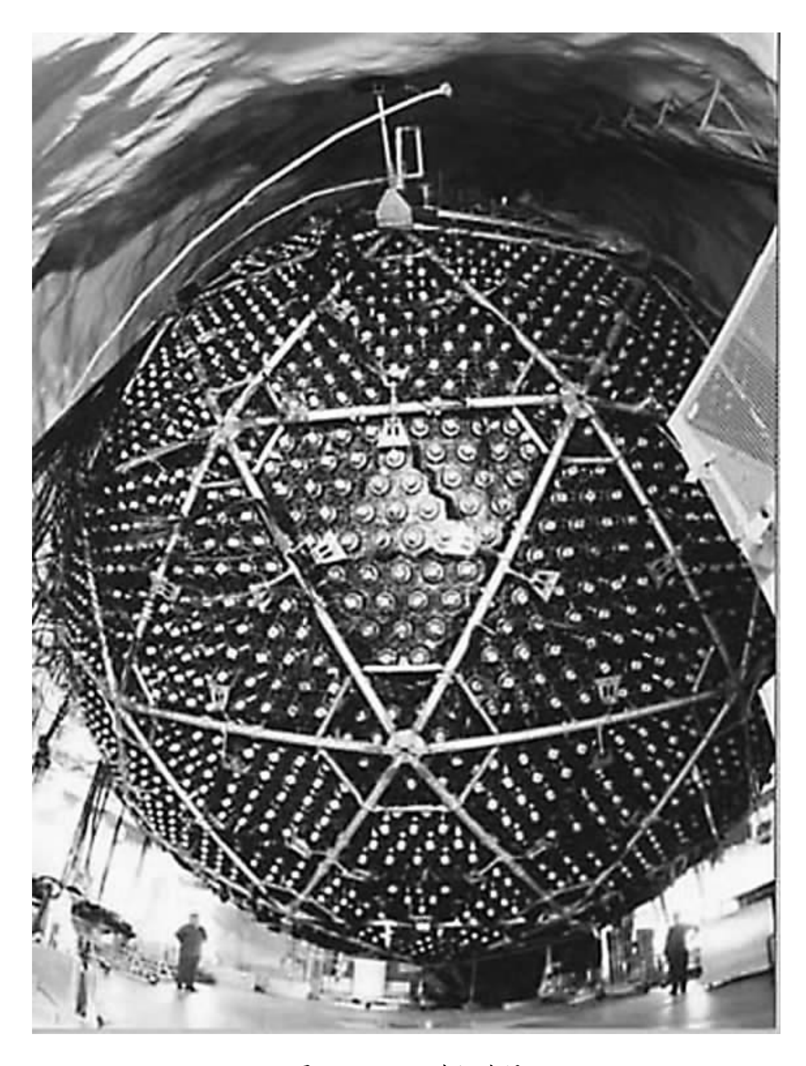


图10.1 SNO探测器

2001年，萨德伯利中微子观测台发布了观测结果，非常漂亮地显示出中微子的总流量在实验精度范围内与标准太阳模型相符，而电子中微子所占的比例，则与中微子振荡所预期的一致。

这样，太阳中微子之谜就被解开了，谜底就是中微子振荡。在标准太阳模型与粒子物理标准模型的对决中，居然是标准太阳模型取得了胜利，这让很多人跌破了眼镜。此后，人们又通过大量的其他实验（包括使用来自加速器及核反应堆的中微子）进一步证实了中微子振荡。经过如此曲折的努力，我们终于完成了第8章末尾所说的为恒星核聚变理论

收集进一步证据的工作，使这一理论得到了牢不可破的确立。

2002年，那位半个世纪前被审稿人揶揄过的“站在山顶上，用自己的手去碰月亮”的太阳中微子探测先驱戴维斯以88岁的高龄，与超级神岡探测器的“头领”，日本物理学家小柴昌俊（Masatoshi Koshiba，1926— ）一同荣获了诺贝尔物理学奖。

2004年，戴维斯当年的合作者、太阳模型专家巴克尔撰写了一篇评述太阳中微子问题的文章。在文章的末尾，他这样写道：

> 当我回顾过去四十年在太阳中微子研究领域所取得的成就时，我感到了惊讶。由数以千计的物理学家、化学家、天文学家和工程师组成的国际团队用他们的合作，展示了通过统计地下矿井里一个盛满纯净液体的游泳池里的放射性原子的数目，就能告诉我们有关太阳核心的重要事实，以及被称为中微子的奇异基本粒子的性质。若非亲身经历了太阳中微子的传奇，这对我来说将会是难以置信的。

一段传奇虽已落幕，但围绕它的谜底却有许多新的问题有待探索，比如中微子的质量从何而来？中微子的质量与电子等粒子的质量是否是同一类型的？等等。一个小小的中微子尚且有如此多的奥秘，更何况太阳呢？因此大家不要离开，我们的太阳故事还将继续。

---

[1]研究太阳中微子问题涉及理论、实验及观测等诸多方面，参与者来自许许多多不同领域，但为行文简洁起见，本节将把参与者统称为“物理学家”，这里预先向其他各“家”致以歉意。

[2]在这里顺便提一下，在调低太阳核心温度的同时除了要维持太

阳的光度外，还必须维持它的核心压强，因为那是抵抗引力坍缩的资本。为了维持太阳的核心压强，物理学家们也引进了一些假设，比如假设太阳核心具有速度惊人的自转，从而能用离心力来抵御一部分引力；或假设太阳核心存在强度惊人的磁场，从而能用磁场压来抵御一部分引力。这些假设各有各的问题，比如核心的高速旋转会使太阳的整体形状及引力四极矩发生变化，与观测矛盾；而太阳核心的强磁场即便存在，也会很快衰减。

[3]这三种中微子分别用电子、μ子及τ子这三种带电轻子来命名不是偶然的，它们之间的一一对应是粒子物理标准模型的基本特征之一。

[4]确切地讲，在太阳中微子的能量范围内，Homestake、SAGE及GALLEX探测器都只能探测电子中微子，神冈及超级神冈探测器则有一定的能力探测μ子中微子和τ子中微子，但敏感度只有探测电子中微子的15%左右。

[5]读者也许会觉得奇怪，在太阳中微子问题尚未出现，实验上又还没发现第二种中微子的年代，庞蒂科夫同学为什么要提出中微子振荡呢？那是因为不久之前，人们刚刚发现了中性K介子系统中的粒子振荡现象。由于中微子也是中性的，因而庞特考沃猜测它也具有类似性质。

[6]有读者也许会问：中微子已经很“微”了，它还能衰变成什么呢？一般认为，那可能会是标准模型中不存在的所谓右旋中微子或左旋反中微子。那种粒子比中微子更不像话，连弱相互作用都不参与，因而被称为惰性中微子（sterile neutrino）。不过，惰性中微子若是存在，其质量有可能相当大，在有些模型中甚至可以达到大统一能标（10^{15}GeV）的量级，比质子还重10^{15}倍。因此，以它为衰变产物的中微

子衰变其实在理论上就不太可能。

[7]若无特殊说明，当我们提到微观粒子的质量时，指的都是静质量。

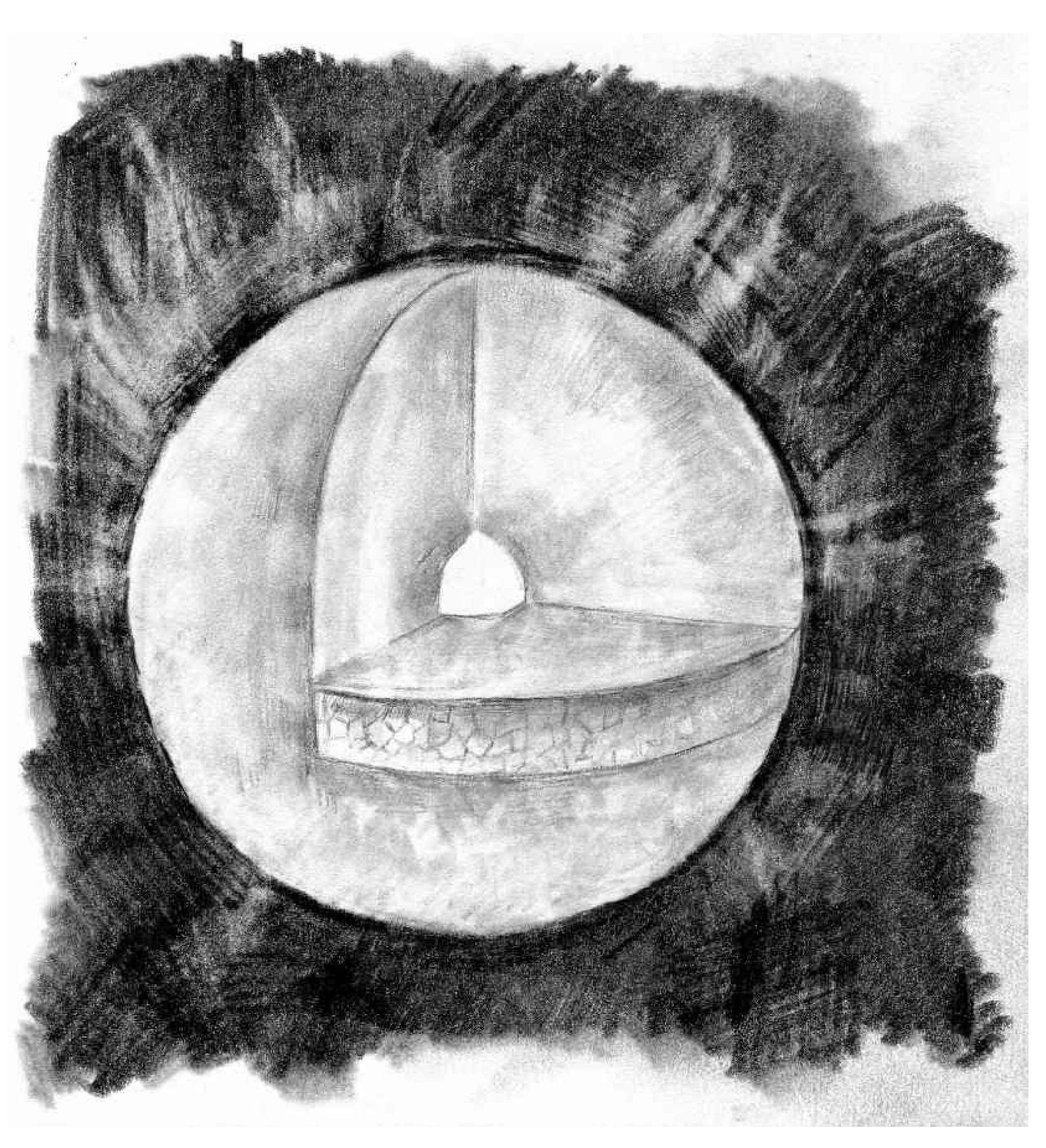
[8]这是因为，我们通常所说的电子中微子、μ子中微子和τ子中微子都是依据它们参与弱相互作用的方式来区分的，用物理学家们的术语来说，是所谓的弱本征态。在中微子全都无质量的情形下，那就是区分中微子的唯一方式。但假如中微子有质量，我们就可以引进另一种区分方法，即按照质量来区分。那样区分出来的中微子状态被称为质量本征态。一般来说，弱本征态与质量本征态是彼此混合但互不相同的，通俗地讲就是“你中有我，我中有你”，这正是中微子振荡的温床。因此中微子振荡只有在中微子有质量（并且质量彼此不同）时才会发生。

[9]确切地说，是与中微子质量本征值的平方差、中微子的能量、中微子弱本征态与质量本征态之间的混合矩阵（mixing matrix），以及中微子的飞行距离等因素有关。

[10]超级神冈探测器所检测的是宇宙线在地球大气层中产生的μ子中微子与电子中微子的相对数目随中微子入射方向的变化。由于入射方向不同的中微子从产生到被检测之间的飞行距离各不相同（两个极端情形是：自上而下入射的中微子的飞行距离约为大气层的厚度，即十几千米；自下而上的中微子的飞行距离则为整个地球的直径，即约13 000千米），如果存在中微子振荡，它们应该有不同的转变概率。通过研究这种转变概率与飞行距离的关联，物理学家们不仅证实了中微子的振荡，而且对某些中微子参数进行了估计。

[11]具体地讲，除中性流反应外，中微子与重水之间还可以发生另

外两类反应：一类是所谓的带电流反应（charged current reaction），它使氘核分裂为两个质子（同时放出一个电子以平衡电荷），在太阳中微子的能量范围内，这种反应只能由电子中微子诱发，从而只能检测电子中微子。另一类则是与神岡及超级神岡探测器所用相同的反应，即中微子与电子的碰撞，它对电子中微子最敏感，但同时也有15%左右的相对敏感度检测到μ子中微子和τ子中微子。



绘画：张京

11 光子大逃亡

在前面几章中，我们介绍了发生在太阳核心区里的太阳能量产生机制。这一机制不仅在理论上可行，而且经过对太阳中微子的细心探测，以及对太阳中微子问题的艰辛求解，在观测上也得到了很漂亮的确立。从某种意义上讲，隐藏在太阳最深处的那个最远离经验的“恐怖核心”，反而可以说是成为了整个太阳结构中被我们了解得最可靠的部分。

如果说迄今为止我们的太阳故事所展现的大都是太阳研究中的坚实大地——那些被观测或实验牢牢确立了的事实或理论——的话，那么从本章开始，我们将会更多地去欣赏太阳研究中的绚烂天空——那些尚在云端里的谜团。我们将会看到，那样的谜团简直是层出不穷，而且在绝大多数谜团面前，我们再也没有像解决太阳能量产生机制或太阳中微子问题那样的好运气了，因为那些谜团中的绝大多数直到今天依然是未解之谜。当然，这本身未尝不是一种好运气，尤其是对于正在从事或有志于从事太阳研究的人来说更是如此，因为生在一个有许多未解之谜可以探索的时代里，要远比生活在一个只能在“小数点后第六位数字”上做文章的时代幸运得多。

好了，现在继续我们的太阳故事。

读者们想必还记得，在我们的注意力被喧宾夺主的中微子吸引走之前，我们是在谈论与阳光有关的话题，比如太阳的光谱、太阳的光度、太阳为什么会发光等。现在我们要把注意力转回到阳光上来——毕竟，那是太阳之所以成为太阳的最重要特征，也是它对我们最至关重要的东西。我们已经知道，阳光的巨大能量来源于发生在太阳核心区的核聚变

反应。那个核心区有多大呢？细致的研究表明，它从“ground zero”算起，向外延伸到大约四分之一个太阳半径——17万千米——处。从体积上讲，这一区域在整个太阳中所占比例不到2%，但由于密度超高，占太阳质量的比例却达到一半左右。在这一区域的边缘，太阳物质的密度从最中心的160克/厘米^{3}左右降到了约20克/厘米^3（略高于黄金的密度），温度则降到了800万度左右。那样的环境虽然仍很恐怖，对于氢核聚变成氦核的核聚变反应来说却已低得有些勉强了，在那以外，核聚变反应就基本绝迹了。[1]

但这个边缘对于太阳能量的主要载体——诞生于恐怖核心的无数光子来说，却是一段新的征程——一条逃亡之路——的开始，它们将用十几万年的漫长时间，穿越厚达几十万千米的太阳物质，把巨大的能量带出去，让“红星”照耀四方。

与中微子的“挥一挥衣袖，不带走一片云彩”相比，光子的逃亡之路可就艰辛多了。原因很简单，因为光子会参与电磁相互作用——即与带电粒子发生相互作用。而更糟糕的是，在太阳的恶劣环境下，物质粒子间存在着极为猛烈的相互碰撞，其结果是“鸡飞蛋打”——几乎每个原子都会被碰掉一些电子。那些被碰掉的电子当然全都是带电粒子，而那些丢了电子的原子——其中大多数已经变成了“一丝不挂”的原子核——也都是带电粒子。因此太阳物质几乎是清一色由带电粒子组成的，是所谓的等离子体（plasma）。光子穿越这种到处都是带电粒子的物质时，就像女人穿越到处都是化妆品专柜的购物城，将会无可避免地受到巨大干扰。

但不管怎么干扰，光子终究是要逃出去的，否则我们就看不到太阳了。我们首先要问的是：在带电粒子的重重包围之下，那些光子究竟是

以何种方式完成胜利大逃亡的庄严任务的？

解决这个问题的思路并不深奥，甚至在中学物理中就已经有了，因为所谓的光子大逃亡，归根到底是一个能量传输问题，即把太阳核心所产生的能量传输出去。而能量的传输有三种众所周知的方式：传导（conduction）、对流（convection）和辐射（radiation）。从微观上讲，这三种传输方式的差别在于：传导主要是通过物质粒子间的相互碰撞来传输能量，但那些物质粒子本身却并不参与大范围的运动，我们做饭时热量通过锅底传到锅内所用的就是这种传输方式；对流主要是通过物质粒子本身的大范围运动来传输能量，我们做饭时，沸腾的水就是用这种方式在传输能量；而辐射则主要是通过光子本身来传输能量，我们围坐在一个火炉旁所感受到的“温暖”就是用这种方式传输过来的能量。

在这三种能量传输方式中，传导在气态物质中通常起不到主要作用（请读者想一想这是为什么），像太阳那样的巨型“气球”也不例外，因此这一选项可以被排除掉。这样一来，我们就只剩下了两个选项：对流和辐射。一道选择题只有两个选项，这运气看来很不错，因为就算瞎蒙也该有一半的可能性答对。

但有关太阳的这道选择题却是一个例外。

对于这道选择题，早年的天文学家们曾经作出过自己的选择，那就是对流，理由是我们所熟悉的唯一一种大范围气态物质——地球大气——就是用这种方式来传输能量的。

可惜那是一个错误选择。

这一选择在1906年遭到了德国物理学家史瓦西（Karl Schwarzschild，1873—1916）的反对。史瓦西认为对于像太阳内部那样

与地球大气截然不同的物理环境，很可能存在一种具有太阳特色的能量传输方式，而不能简单地套用地球大气的经验。作为对这一观点的论述，他提出了一种判断太阳内部是否会出现对流的巧妙方法，那就是从理论上分析一小团太阳物质的运动，看它能否演变成对流。

具体地说，史瓦西从理论上考察了一小团由于偶然原因而变得比周围环境稍热的太阳物质。由于热胀冷缩的缘故，那一小团物质的体积会稍稍膨胀，密度则会稍稍降低，由此产生的后果是在周围物质的浮力作用下上升。但在上升的过程中，由于周围太阳物质的压强在变小（因为太阳物质的压强是越往上就越小——请读者想一想这是为什么），它会发生进一步的膨胀，这种膨胀会使它的温度降低。[2]另一方面，随着这一小团物质的上升，它周围环境的温度也在降低，因为太阳内部物质的平均温度也是越往上（即越远离核心区）越低。既然那一小团物质与它周围环境的温度都在降低，显然就出现了哪个温度降低得更快的问题。如果是周围环境的温度降低得更快，那么该小团物质将会在上升过程中维持比周围环境更热的特点，从而持续上升，那样就会产生对流。反之则它的上升势头会因温度降低得比周围环境更快而终止，并在重力的作用下转为下降，那样就不会产生对流。

这样，史瓦西就提出了一个分析太阳内部能否产生对流的判据，即通过比较太阳内部物质的平均温度变化与一小团特定物质在上升过程中的温度变化，来判断能否产生对流。这一判据被称为史瓦西判据（Schwarzschild criterion）。利用这一判据，史瓦西推翻了前人的选择，代之以自己的选择，那就是辐射。

可惜那也是一个错误选择。

读者可能会纳闷：一道只有两个选项的选择题，怎么会两个选项都

错误呢？原因很简单：因为两个选项都不完全，都只在一定区域内才适用，把无论哪个选项当做完整答案都是错误的。那么，怎样才能得到完整答案呢？只有一个办法，那就是计算。既然史瓦西给出了分析太阳内部能否产生对流的判据，那我们就可以——而且必须——通过计算来作出判断。这种计算所依据的就是我们在前几章中已经多次提到过的标准太阳模型。那个模型是建立在一系列很基本的物理原理——比如能量的守恒、压强的平衡等——的基础之上的，虽然算不上精细，但以粗线条而论却有很大的可靠性。史瓦西本人虽然由于他那个时代的知识所限而没能得到正确结论，但我们这些“站在巨人肩上”的幸运儿却毫无疑问可以做得比他更好一些。

那么利用标准太阳模型所做的计算给出了怎样的答案呢？那答案就是：太阳内部的能量传输方式既不是单纯的对流也不是单纯的辐射，而是在不同区域内有不同的主导方式。具体地说，在从太阳核心区的边缘（即太阳半径的四分之一处）到太阳半径的70%处（即距离太阳中心约49万千米处）的厚度约32万千米的物质层内，史瓦西判据得不到满足，能量的传输以辐射为主。这一层因此而被称为辐射区（radiative zone），它占太阳总体积和总质量的比例分别约为32%和48%。在辐射区的外部边缘，太阳物质的温度降到了“只有”200万度，密度则降到了0.2克/厘米^3（相当于水的密度的五分之一）。在那以外直到太阳表面的厚度约20万千米的物质层内，[3]史瓦西判据得到满足，能量的传输方式转为以对流为主，这一层因此而被称为对流区（convective zone），它约占太阳总体积的66%，但由于物质密度很低，在太阳总质量中却只占了2%左右（仍相当于6 600个地球的质量）（彩图8）。

有了这样的大致图像，现在我们可以来谈谈光子大逃亡的具体过程了。由太阳核心核聚变反应所产生的光子大都“膘肥体壮”（满载着能

量），比如第一类质子-质子链所产生的光子的能量在百万电子伏特（MeV）量级上，属于γ射线（gamma ray）的范围。[4]如果它们在逃亡时有像中微子那样的能耐，接下来的故事将只需两秒钟就能完成，不过那样的话，我们也就不可能在这里读这篇文章了，因为那样的话，地球将会沐浴在致命的γ射线之中，生命的产生几乎是不可能的。幸运的是，如前所述，光子由于会参与电磁相互作用，从而在本质上是等离子体的太阳物质中无可避免地会受到巨大阻挠。计算表明，在太阳辐射区中，可怜的光子平均飞行不到1毫米就会遭遇“灭顶之灾”——被带电粒子所吸收。不过带电粒子的胃口也很有限，并无能力把一个高能光子单独“消化”掉。事实上，它们“吞下”光子后一方面会通过碰撞把一部分能量分给其他带电粒子，另一方面会几乎立刻就重新吐出一个或多个光子。那些浴火重生的新光子在能量和运动方向上都有很大的随机性，有些甚至“天堂有路它不走，地狱无门自来投”——重新向着“地狱”（核反应区）的方向飞去。如果我们追踪一个高能光子和它那些被吸收后重新发射出来的“子孙后代”的去向，我们将会发现，它们就像一群醉汉一样随处游荡。

不过，如果我们更仔细地观察这群“醉汉”，我们又会发现一些微妙的特点。比如当它们往太阳表面方向运动时，平均来说会比往相反方向运动时多走一小段距离，那是因为太阳物质的分布是越往表面方向密度越低，因此往表面方向运动的光子在被带电粒子吸收之前就有可能运动较长的距离。由于这个微妙的差别，那些“醉汉”虽然浑浑噩噩，总体上却是在缓慢地向着太阳表面方向运动着。另一个微妙的特点是，被带电粒子发射出来的新光子的“诞生地”越靠近太阳表面，其平均能量就越低。这是太阳物质的温度越靠近表面就越低这一特点所产生的平均意义上的影响。因为这两个微妙特点的共同存在，光子在辐射区中的逃离路线虽然极度曲折，但最终的效果却是慢慢地向外逃逸，而且在逃逸过程

中逐渐“减肥”（能量逐渐降低）。那么，这种逃亡生涯啥时候才是个尽头呢？计算表明，一个高能光子穿越太阳辐射区平均需要17万年的时间，[5]这并不是因为光子的运动速度变慢了，而纯粹是因为运动路线过于曲折。

在辐射区中，由于史瓦西判据得不到满足，太阳物质不会发生显著的对流，因此这个区域内的太阳物质相对来说是比较宁静的。如果我们能乘坐一艘假想的飞船缓缓穿越这一区域的话，相对来说将不会太颠簸。不过这种宁静在我们抵达辐射区的顶部时就开始消失了。在那里，由于史瓦西判据开始得到满足，太阳物质无法继续维持大体上静态的平衡，无时不在的温度涨落将会使得热气团上升、“冷”气团下降，从而形成对流。如果我们继续乘坐飞船的话，滋味可就不太好受了。

细心的读者在这里可能会提出一个问题：那就是史瓦西判据得到满足只是说明在太阳物质中会产生对流，却并不表明对流一定会成为能量传输的主导方式，那么在对流区里究竟是以哪一种能量传输方式为主导呢？答案是对流（否则就不叫对流区了），因为在对流区里，太阳物质由于温度降低而变得不那么透明了，从而对辐射产生了抑制作用。[6]在对流区里，光子携带的能量变成了热气团的内能，随着它们的对流运动而传向太阳表面。要说团体的力量还就是大，气团的运动速度虽然远不能与光子相比，但它们却不会像光子那样处处受到阻挠，其结果是，光子要用17万年的时间才能走完厚度为32万千米的辐射区，对流却只需十来天的时间就能走完厚度为20万千米的对流区。

那么，对流区中对流的具体形式，即那些气团的具体运动又是怎样的呢？这却是一个极难回答的问题，因为用流体力学理论所做的简单评估表明，太阳对流区中的对流是所谓的湍流型对流（turbulent

convection），它作为能量传输方式是非常有效的，[7]但从机理上讲却复杂得令人望而生畏，因为它涉及一种迄今仍未被完全理解的现象——湍流（turbulence）。科学家们研究湍流已有上百年的历史，却始终未能参透它的奥秘。美国物理学家费恩曼（Richard Feynman，1918—1988）曾把湍流称为是“尚未解决的经典物理学问题中最重要的一个”。而据说著名物理学家海森伯（Werner Heisenberg，1901—1976）在去世前不久也曾表示，当他见到上帝时将会问上帝两个问题：一个是为什么会有相对论，另一个是为什么会有湍流。他认为上帝有可能可以回答第一个问题。[8]

但研究太阳结构的科学家们却想要回答第二个问题。

这个愿望迄今仍未实现。不过在长期的研究中，科学家们发展出了一些近似理论，其中很重要的一个近似理论是德国空气动力学家普朗特（Ludwig Prandtl，1875—1953）在20世纪20年代提出的，它把湍流中的流体元与分子运动论中的分子相类比，尤其是将湍流运动中一个流体元在与其他流体元相混合之前所走过的平均距离与分子运动论中的分子平均自由程（即分子在两次相邻碰撞之间所运动的平均距离）相类比。这种近似理论被称为混合程理论（mixing length theory）。自20世纪30年代开始，德国天体物理学家比尔曼（Ludwig Biermann，1907—1986）等人将这一理论运用到了研究太阳对流区的能量传输上。20世纪50年代，人们又进一步将这一理论与恒星结构模型结合起来，使之变得更为系统。再往后，随着计算机技术的飞速发展，人们开始对太阳对流区中的运动进行计算机模拟，混合程理论在那里也得到了重要应用。这类理论虽然明显只具有近似意义，但迄今为止的模拟计算显示，它可以给出定性上还算不错的结果。这种类型的结果是目前人们对太阳对流区研究的最佳成果之一。

与深藏在太阳内部的核反应区及辐射区不同，对流区由于一直延伸到太阳表面，因此对这一区域的研究结果是可以与直接观测相对比的。这就好比当我们研究一锅沸水的时候，哪怕这水是不透明的，我们也可以通过观察因水流翻腾而形成的表面波纹来推断水的沸腾程度及其他一些相关特征。太阳的表面也是如此。早在1801年，英国天文学家赫歇耳（William Herschel，1738—1822）就在太阳表面——确切地说是在太阳大气层底部的光球层中——发现了无数形如米粒的斑点，这种斑点被称为了米粒（granule）——科学家们在取名字方面的想象力看来是很贫乏的。

这些“米粒”当然只是远远看起来才像是米粒，如果跑近了看的话，每个的线度都有1 500千米左右，是面积比新疆还大的巨型结构，只不过是放在太阳的庞大表面上，才显得微乎其微而已。简单的估算表明，太阳表面足可容纳几百万个“米粒”。彩图9是一幅典型的“米粒”图片，细致的观测表明，在那些“米粒”中，炽热的气体以每秒几百米的速度从明亮处升起，并向外迸射出大量光子——它们此刻的能量已降到了可见光区附近。由于那儿已是太阳的表面，再没有什么东西可以有效地阻碍重获自由的光子，它们随即以天下第一的逃命速度飞离太阳，为历时十几万年的长征画上句号。由于光子的逃离带走了能量，“米粒”中的气体温度迅速下降，并在颜色较暗的边缘部位收缩下沉。一个“米粒”的典型寿命只有几分钟。

太阳表面的“米粒”是发生在对流区中的对流运动的体现，这一点是毫无疑问的。但与这种对流有关的一个插曲值得在这里介绍一下。曾经有一段时间，天体物理学家们普遍认为“米粒”以及太阳表层的对流运动是人们在流体力学中所发现的一种称为贝纳胞（Bénard cell，彩图10）的结构在太阳上的翻版。贝纳胞是1900年法国物理学家贝纳（Henri

Bénard，1874—1939）在自下而上加热一个液体薄层时所发现的对流形式，它与太阳表面的“米粒”不仅具有外观上的相似性，而且在生成条件上也一度被认为是相同的，因为两者都被认为是在重力和浮力的共同作用下由对流运动产生的。

粗看起来，这是一个展示不同尺度物理现象之间相似性的漂亮结果。但这种相似性却在1958年遭到了严重质疑，因为人们发现在贝纳胞的形成过程中，一个曾经被忽略的因素——液体的表面张力——起了不可忽视的作用。为了证实这一点，科学家们甚至在“阿波罗14号”（Apollol4）登月飞船的无重力环境下进行了贝纳胞实验，结果发现在重力和浮力都不存在的环境下依然可以出现贝纳胞，它的幕后推手是表面张力。这一结果不仅打破了对贝纳胞的传统理解，而且直接削弱了它与太阳“米粒”之间的可比性，因为在太阳表面极端稀薄的气体环境里并不存在表面张力，因此“米粒”的形成机制与贝纳胞起码是不可能完全相同的。这段插曲是一个很好的例子，说明在太阳物理学的研究中存在很多微妙的地方，只有很仔细地考虑到太阳环境的特殊性，才能避免似是而非的理解。

太阳表面的“米粒”除了那无数个线度约为1 500千米的“小”米粒外，20世纪50年代，人们在观测太阳表面物质的速度分布时，还发现了一种线度为2万～3万千米的大尺度结构，它的面积比整个地球的表面积还大，它名字则跟“米粒”一样贫乏，叫做“超米粒”（supergranule）。这种“超米粒”的寿命比普通“米粒”长得多，可以有1～2天。在太阳圆面上，几乎每一时刻都分布着两三千个“超米粒”。与“米粒”不同的是，“超米粒”的速度分布基本上是水平的，无法找到像热气团上升、“冷”气团下沉那样简单的物理结构，从而无法把它们与对流运动简单地联系起来。“超米粒”的结构和成因也因此而成为了太阳物理中的一

个不解之谜。

更热闹的是，除了“米粒”和“超米粒”外，1981年，人们还发现了一种线度约几千千米，介于“米粒”和“超米粒”之间的新型“米粒”，它的名字读者们一定猜到了，就叫做“中米粒”（mesogranule）。“中米粒”的发现受到了一部分天体物理学家的欢迎，因为早在1961年就有人提出过，太阳对流区中的对流有可能具有不同的层次，“米粒”和“超米粒”分别对应于其中较小和较大的层次，但介于两者之间的层次却一直未能得到观测上的支持。“中米粒”的发现可以说是填补了这一空白。但不幸的是，这一观测与理论之间看上去很美的契合后来也遭到了质疑。有些科学家在仔细研究了观测数据后，认为“中米粒”有可能只是对太阳表面物质的速度分布进行分析时采用了不恰当的统计方法所导致的“幽灵结构”，它其实根本就不存在。这方面的争议迄今仍未得到解决。

因此，不仅“超米粒”是一个谜，“中米粒”也是一个谜，只不过前者之谜在于结构和成因，而后者则干脆连存在性本身都是一个谜。那么普通“米粒”又如何呢？它是唯一一种与对流运动存在明显对应的“米粒”，从这个意义上讲，它是三种“米粒”当中被理解得最充分的一种。但即便对于它，也仍有很多微妙的地方有待理解，否则人们也就不会轻易犯下将它视为贝纳胞那样的错误了。事实上，如果把太阳上各种主要的复杂因素——比如太阳的自转或磁场等——的影响全都考虑在内的话，即便对于普通“米粒”的结构和成因，也还有很多需要探索的地方。

现在让我们把迄今介绍过的太阳内部结构列成一个简单的表格：

区域名称	范　　围	主要现象	检验方法
核心区	0～17万千米	核聚变反应	探测各个能区的太阳中微子

辐射区	17万～49万千米	以辐射为主的能量传输	?
对流区	49万～69.5万千米	以对流为主的能量传输	观测太阳表面的各种“米粒”

这个表格最引人注目的地方想必读者们都看出来了，那就是在辐射区的检验方法一栏中有一个问号。其实不仅在辐射区的检验方法一栏中有一个问号，在对流区的检验方法一栏中也起码有半个问号，因为观测太阳表面的各种“米粒”虽然能告诉我们一些有关对流区的信息，但那些信息大都局限在最靠近太阳表面的那部分对流区里，相对于厚度达20万千米的整个对流区来说充其量只能算是“皮毛”。

那么，有没有什么手段，能像太阳中微子带给我们核心区的信息那样，带给我们有关对流区深处及辐射区的信息呢？

---

[1] 当然，太阳核心区的边界并不是一个鲜明的几何边界，而是一个有一定厚度的渐变区域，而且即便在这一渐变区域之外，核聚变反应也只是少到可以忽略而并非绝对不可能。这一点不仅适用于核心区的边界，而且也适用于后面将要提到的任何其他区域之间的边界。

[2] 在史瓦西的分析中，这一小团物质的上升过程被假定为是绝热的，即与周围太阳物质之间几乎不交换热量。这是一种近似。在这种近似下，膨胀会使这一小团物质的内能减少（因为一部分内能会消耗在膨胀导致的对外做功上），从而使得温度降低。另外顺便提一下，这位史瓦西就是那位给出了广义相对论的第一个非平凡严格解——史瓦西解——的史瓦西。

[3]需要提醒读者注意的是，这里所说的太阳表面并不是我们肉眼所见的太阳表面，后者——如我们将在后文中加以介绍的——其实是隶属于太阳大气层的。

[4]人们通常把能量在0.1 MeV以上的光子称为γ射线。作为对比，可见光光子的能量只有2～3 eV。

[5]熟悉布朗运动（Brownian motion）或随机游走（random walk）问题的读者可以利用本文提供的信息自己估算一下这一时间，看能否得出数量级相近的结果。

[6]温度降低之所以能使太阳物质变得不那么透明，一个重要的原因是随着温度降低，重原子核开始有机会俘获一部分电子，这些俘获了一部分电子的重原子核吸收光子的能力比裸核大得多（因为它们有密集的电子能级，可以通过电子跃迁吸收光子）。太阳物质在对流区里变得不那么透明不是偶然的，事实上，正是因为太阳物质变得不那么透明了，才使得温度分布发生了新的变化，进而使史瓦西判据得到了满足。

[7]湍流性对流不仅是一种极为有效的能量传输方式，而且对太阳来说还有许多其他影响，比如能使太阳的物质均匀化，以及能把太阳深处的重元素带到太阳表面等。人们能够在太阳光谱中发现重元素的谱线，在很大程度上就得益于湍流性对流的存在。

[8]这个故事流传甚广，但可信度不高，八卦价值大于历史价值。



绘画：张京

12　太阳的脉搏

为了回答第11章末尾的问题，即“有没有什么手段，能像太阳中微子带给我们核心区的信息那样，带给我们有关对流区深处及辐射区的信息呢”？让我们把时钟拨到1960年。那一年，在意大利科摩湖畔的一座美丽小镇召开了一次天文学会议。在会上，来自美国威尔逊山天文台（Mount Wilson Observatory）的天文学家莱顿（Robert Leighton，1919—1997）作了一个学术报告。

这位莱顿，学物理的读者可能有点印象，他曾与同事一起，用两年时间，将著名美国物理学家费恩曼（Richard Feynman，1918—1988）的讲课录音整理成风行全球的《费恩曼物理学讲义》（*The Feynman Lectures on Physics*）。在1960年的那次报告中，他介绍了自己对太阳大气层中气流运动的观测研究。

这不是一项轻而易举的研究。我们知道，在地球大气层中如果要观测气流运动，最简单的办法就是放置风速风向仪，但这招显然无法用于太阳。那么，太阳大气层中的气流运动该如何观测呢？科学家们想到了一种物理效应：多普勒效应（Doppler effect）。该效应的一个让人耳朵听出老茧来的例子，是火车交汇时对方火车的汽笛声由迎面而来时的尖锐，变成交错而过后的低缓。用物理学家们的术语来说，多普勒效应显示的是波源与观测者的相对运动对波长和频率的影响，它既适用于声波，也适用于光波，只不过后者的波速实在太快，使我们无法用感官直接体验。但科学家们可以用仪器来延伸自己的感官，从而可以观测光波的多普勒效应，并以此推算出光源相对于我们的运动速度。

观测光波多普勒效应的最典型做法，是对光波的光谱进行精密观测。我们在第6章中介绍过，每种元素都有自己独特的光谱，就像每个人都有独特的指纹一样。而所谓独特的光谱，说白了就是独特的谱线波长和频率。因为有这种独特性，当谱线的波长和频率因多普勒效应而发生偏移时，我们就能明确无误地察觉出偏移，并依据偏移大小推算出光源的运动速度，这正是莱顿所用的基本方法。[1]

通过这种方法，莱顿发现了什么呢？他发现太阳这个庞然大物在颤抖，而且是有规律地颤抖！确切地说，他发现太阳大气层中的气流运动不是完全无序的，而是存在一种周期约为五分钟的振荡，这种振荡被称为“五分钟振荡”（five-minute oscillation）。

这一发现在太阳研究中具有里程碑式的意义，虽然其真正价值直到十几年后才被发掘出来，但它当场就给与会者中的一位带来了巨大震动。此人名叫埃文斯（John Evans，1909—1999），是萨克拉门托峰天文台（Sacramento Peak Observatory）的台长。莱顿的报告之所以给他带来巨大震动，是因为他研究的恰好也是太阳大气层中的气流运动。为什么莱顿发现了新东西而他却没有呢？因为他的研究重点是气流运动的空间分布，而非时间变化。平心而论，他对研究重点的这一选择并非毫无道理，因为如我们在第11章中所说，太阳上的气流运动是所谓的湍流型对流，这种运动的时间变化被认为是无序的，空间分布则因为有“米粒”之类的结构，以及物质密度的逐层递变，而不无探索余地。因此，埃文斯的研究重点可以说是很自然的选择。遗憾的是，科学发现有时偏偏是出人意料的，“五分钟振荡”对埃文斯来说就是如此。他对研究重点的自然选择恰恰使他与该领域最重大的发现失之交臂。

但遗憾归遗憾，成熟的研究者是不会因遗憾而消沉的。“五分钟振

荡”虽已被发现，进一步的观测仍是必不可少的。更重要的是，这一现象的产生机制还是一个空白，而且在这点上，莱顿本人表示了一定程度的悲观，他认为对“五分钟振荡”做出精确计算似乎是毫无希望的。这一切对于其他研究者来说无疑都是机会。

回到萨克拉门托峰天文台后，埃文斯立刻对“五分钟振荡”展开了研究。第二年，莱顿与埃文斯又在学术会议中相遇了。这一回，埃文斯也作了有关“五分钟振荡”的报告。在报告中，他不仅证实了莱顿的观测，还利用自己在以前那些与“五分钟振荡”失之交臂的研究中发展起来的“独门绝活”，对莱顿的观测作出了重要补充。他的“独门绝活”是什么呢？是同时研究几条不同谱线的多普勒效应。这种“独门绝活”有什么用呢？用处就在于能研究太阳大气层中不同高度处的气流运动。这是因为不同高度处的元素分布存在一定差异，而谱线是由元素产生的，因此不同谱线所对应的是不同高度处的气流运动。通过对这种不同高度处的气流运动的观测，埃文斯对“五分钟振荡”在太阳大气层中的空间传播进行了粗略研究，并提出了一种“五分钟振荡”的产生机制。

埃文斯认为，“五分钟振荡”是一种由太阳表面的“米粒”所激发的大气层现象。具体地说，他认为“米粒”的上升犹如推动气体的巨型活塞（piston），而“五分钟振荡”则是“活塞”运动在太阳大气层中激发出的声波。这一机制听起来不无道理。因为“五分钟振荡”是在观测太阳大气层中的气流运动时发现的，而“米粒”，如我们在第11章中所说，则是在太阳大气层底部的光球层中被发现的，而且是光球层中分布最广的结构。这两者同属太阳大气层，将它们联系起来，并在太阳大气层的范围之内解决问题无疑是很自然的思路。这种很自然的思路在将近十年的时间里吸引了多数研究者的目光。

不过，埃文斯的机制要想行得通，还必须解决一个关键性的问题，

那就是被“活塞”激发出的声波为什么偏偏要青睐“五分钟”这一振荡周期呢？这个问题成为了很多研究者的努力方向。

在介绍那些努力之前，我们要先对太阳大气层的结构作一个简单介绍。如上所述，太阳大气层的最底部，是“米粒”们赖以存身的光球层（photosphere）[2]。我们肉眼所见的阳光大都来自该层，第7章中介绍过的太阳表面温度（约5 800 K）也是指该层的有效温度。该层的厚度在几十到几百千米左右，物质密度约为海平面附近地球大气密度的万分之一。在光球层之上，是所谓的温度最低层（coolest layer），该层的有效温度约为4 100 K，厚度约为500千米。再往上，则是厚度约2 000千米的色球层[3]。该层自内向外密度递减几百万倍，温度却不降反增，上层温度可达20 000 K左右（原因将在后文中介绍）。色球层再往上，还有所谓的过渡区（transition region）和日冕（corona）等，因与本章无关，暂且按下不表。

现在回到埃文斯机制所面临的那个关键问题上来。很明显，太阳表面环境的恶劣性，使得无论什么机制产生的声波都必然是紊乱的，而不可能只有一个固定周期。那么，究竟是什么原因使得“五分钟”这一周期脱颖而出呢？科学家们想到了乐器中的谐振腔（resonant cavity）。在乐器中，谐振腔的作用是使特定周期的声波得到加强，其余则被抑制。科学家们想到，如果太阳大气层也有类似功能，岂不就有可能解释“五分钟振荡”了吗？

这是一个很漂亮的想法。不过科学离不开细节，光有想法是不够的，还必须有计算。为了进行计算，我们必须知道太阳大气层是如何构成谐振腔的？我们知道，谐振腔之所以能加强特定周期的声波，抑制其余，是因为声波经腔壁反射后与腔内声波发生干涉之故。因此，要想知

道太阳大气层如何构成谐振腔，关键在于找到腔壁。对此，科学家们提出了各种假设。

比如有一种假设认为，腔壁位于温度最低层的上下两侧。为什么呢？因为气体中的声波波速会随温度升高而增大，[4]这意味着在温度最低层的上下两侧，声波波速都会增大（因为温度升高）。另一方面，当声波从波速小的区域进入波速大的区域时，会因折射而往水平方向偏折。[5]将这两点联系起来，就有可能出现这样一种情形，即在温度最低层附近的区域里，声波无论向上还是向下传播，都会往水平方向偏折，直至被反射回来为止。这种情形一旦成真，那两个使声波反射回来的界面无疑就构成了谐振腔的腔壁。

类似的假设还有若干种，我们就不一一列举了。可以告诉大家的是，所有这些在太阳大气层里做文章的假设在经过具体计算后，全都遭遇了滑铁卢。埃文斯是一位努力的研究者，但看来不是一员福将，他对研究重点的“自然选择”使他与“五分钟振荡”的发现失之交臂，他对产生机制的“自然选择”则将一系列努力引向了困难。这其中一个典型的困难是因为太阳大气层内的谐振腔全都是薄层，声波要想被那样的薄层所禁锢，其传播方向必须很接近水平（否则的话，虽然能被偏折，却无法偏折到被反射的程度）。而观测却发现，“五分钟振荡”的传播方向有很大的垂直分量。另一方面，即便声波的传播方向真的很接近水平，那些假设也还是玩不转，因为计算出的周期不对头，无法集中在五分钟附近。此外，有些假设给出的“五分钟振荡”的寿命也不对，只有几分钟，而实际观测到的“五分钟振荡”往往可以持续数小时、数天、乃至数月。至于埃文斯把“米粒”视为“五分钟振荡”的起因，其正确与否倒显得不那么重要，因为在太阳那样的恶劣环境下，有许多因素可以产生声波，起因不是关键。

所有假设都碰了壁，莫非应了莱顿的“乌鸦嘴”，对“五分钟振荡”做出精确计算是毫无希望的？

没有人知道答案。但任何谜团对科学家来说都是召唤，是不断攀登的动力。山峰越高，顶上的风景或许就越别致。1970年，一位新的攀登者——加州大学洛杉矶分校（University of California at Los Angeles）的一位助理教授——提出了一种“五分钟振荡”的新机制。这位助理教授名叫乌尔里克（Roger Ulrich），本科学的是化学，后来转向天文，1968年才刚刚获得博士学位。这位“新科博士”的过人之处是一举摆脱了在太阳大气层中做文章的“陋习”。对乌尔里克来说，“五分钟振荡”在太阳大气层中被发现，并不意味着它一定就是单纯的大气层现象。理由很简单，太阳物质在大气层以下是不透明的，因此普通光学手段注定只能发现大气层中的运动，这只是观测手段的局限性，并不说明现象本身的范围。这就好比用肉眼只能看到水面以上的冰山，并不说明冰山只存在于水面以上。

事实上，在乌尔里克之前，美国基特峰国家天文台（Kitt Peak National Observatory）的天文学家弗雷泽（Edward Frazier）就已经发现了“五分钟振荡”存在于太阳深处的迹象。因为他发现太阳的亮度会因“五分钟振荡”而发生细微变化。由于太阳的亮度取决于能量，而后者来自太阳内部，单纯的大气层振荡是无法对其产生重大影响的，因此亮度变化说明“五分钟振荡”与太阳内部物质的运动也有关系。弗雷泽的这一观测发现给了乌尔里克很大的启示，使他将注意力投向了太阳内部。

乌尔里克将注意力投向太阳内部，除受弗雷泽的影响外，与他自己的学术背景也不无关系，因为他博士论文所研究的就是太阳内部的对流区。方向有了，接下来还得看细节。乌尔里克知道，那些被观测否决掉的大气层假设并非一无是处，它们的一个关键部分必须得到保留，那就

是谐振腔，因为那是在像太阳那样高度无序的世界里产生特定周期的唯一手段。既然保留了谐振腔，那么新机制的关键就依然是：腔壁在哪里？对于这个问题，乌尔里克给出了全新的答案。

在乌尔里克的答案中，上方腔壁位于对流区顶部很接近光球层的区域。该区域之所以成为腔壁，是因为声波在太阳内部的传播存在一个所谓的截止频率（cut-off frequency），只有频率高于截止频率的声波才能传播。不仅如此，这一截止频率还与温度有关，温度越低（即越接近太阳表面），截止频率就越高，能够传播的声波也就越少。[6]计算表明，在对流区顶部接近光球层的区域中，截止频率将会高到使几乎所有声波都无法传播的程度。自内向外的声波碰到这种区域时，将会像光线碰到镜面一样遭到反射[7]，这毫无疑问就构成了腔壁。

那么，下方腔壁又在哪里呢？在太阳肚子里。这一腔壁的原理（彩图11）与上文介绍的大气层假设相同，即源于声波的折射。具体地说，越往太阳肚子里走，声波的波速就越高（因为温度升高），经折射后就越往水平方向偏折，直至被反射回来为止。与大气层假设不同的是，乌尔里克的机制将整个太阳内部都作为声波的活动场所，有足够大的空间使声波“浪子回头”，因而不必像大气层假设那样要求其传播方向接近水平。另外，从这一机制中不难看到，下方腔壁的位置不是固定的，而与声波的传播方向有关。传播方向越接近水平（比如图中位于对流区中的红色曲线），下方腔壁的位置就越浅，声波在上方腔壁的反射次数则越多（即水平方向的波长越短）；反之，传播方向越接近垂直（比如图中透入辐射区的黄色和绿色曲线），下方腔壁的位置就越深，声波在上方腔壁的反射次数则越少（即水平方向的波长越长）；当传播方向垂直到一定程度时（比如图中深入核心区的蓝色曲线），甚至会出现下方边界消失，完全靠上方边界反射的情形（这依然构成谐振腔）。

定量计算表明，乌尔里克的机制可以克服大气层假设所面临的各种困难。不仅如此，这一机制还预言了一些尚未被观测到的东西。其中最突出的一个，是它预言“五分钟振荡”不是单一频率的振荡，而是由一系列彼此接近的频率共同组成的，每个频率对应于一个不同的水平波长（horizontal wavelength）。如果将频率与水平波长间的关系绘成图线的话，很像是一系列抛物线。这个预言对乌尔里克机制具有判决性的意义。如果它被证实，那么乌尔里克机制就会像科学史上许多其他成功理论一样，经由从观测到理论，从理论到预言，再从预言到证实那样的典型模式而被确立。反之，如果它被否决，那就没啥可说了，该机制只能乖乖入住博物馆。

那么，观测给出了怎样的判决呢？别着急，得等五年时间，因为当时人们对“五分钟振荡”的观测精度还不够高。在等待期间有必要提到的是，几乎与乌尔里克同时，两位哈佛大学（Harvard University）的研究者也提出了类似的机制，并进行了数值计算。不过他们没有预言频率与水平波长间的关系。1972年，另一位研究者对乌尔里克的机制进行了改进，去除了一些粗糙近似。1975年，日本东京大学（Tokyo University）的两位研究者对声波在上方腔壁的反射进行了更细致的研究，给出了频率与水平波长间更精确的关系（与乌尔里克的结果相差不大）。

与这些理论进展同步，观测数据也在积累之中。乌尔里克本人无疑是最急切盼望观测结果的人，为了让观测“提速”，他将自己的研究生罗兹（Edward Rhodes）派往了萨克拉门托峰天文台（即埃文斯工作过的地方）。1975年，当罗兹积累了足够多的数据，准备撰写博士论文时，一个不幸的消息传了过来：他被人抢了——不是抢劫，是抢先。德国夫琅禾费研究所（Fraunhofer Institute）的天文学家德伯纳（Franz-Ludwig Deubner）已经发表了类似的观测结果。一年后，罗兹也发表了自己的

结果。那些观测结果没有让乌尔里克失望，它们的精度虽只能达到百分之几的量级，却明显地显示出了乌尔里克预言的抛物线（图12.1）。

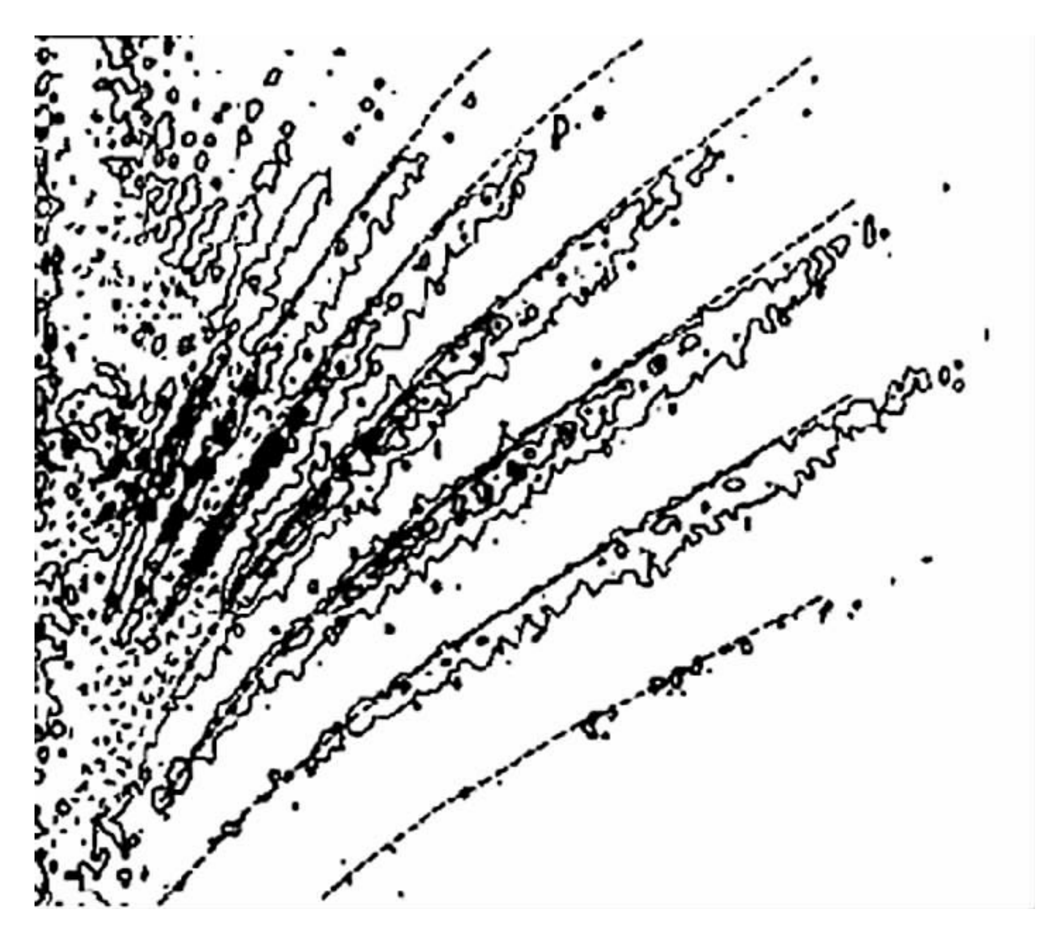


图12.1　“五分钟振荡”的早期观测结果

这样，乌尔里克的机制就得到了初步证实。这不仅对乌尔里克是一个喜讯，对于太阳研究更是具有划时代的重要性，因为它开启了一个全新的研究领域：日震学（helioseismologyh这是一个通过观测太阳上的各种振荡现象来研究太阳内部结构的新领域。在那些振荡现象中，以类型而论，最重要的是上面所介绍的声波，这是一种压强波，也称为p模（p来自于“压强”的英文pressure）；以周期而论，最重要的是上面所介绍的“五分钟振荡”。但除此之外，也还有其他一些类型和其他的周期，不过因为观测比较困难，重要性相对较低，就不在这里讨论了。[8]日震学

之所以重要，是因为乌尔里克机制告诉我们太阳上的振荡可以深入太阳内部的各个区域，因此日震学可以带给我们有关太阳内部各个区域的重要信息。像温度、密度、元素丰度、自转速度等与振荡传播有关的性质都可以通过日震学手段来加以研究。打个比方来说，太阳上的振荡仿佛是太阳的脉搏，而日震学手段则相当于是给太阳把脉问诊。乌尔里克攀到了山顶，那里的风景果然很别致，可以一直看到太阳的肚子里。不过要指出的是，日震学这个与地震学相类似的名称其实并不贴切，太阳上虽然有日震，但日震只是产生振荡的诸多原因之一，而且日震本身并非日震学研究的对象。

日震学这一研究领域虽然诞生了，但为了让它真正发挥作用，除不断改进理论计算外，还必须在观测上精益求精，其中最重要的一条是得把振荡周期尽可能测准了。在大学甚至中学物理实验课上做过周期测量的读者想必都知道，要想把一个周期运动的周期尽可能测准，要诀是观测尽可能多的周期数目。周期数目越多，所测周期的相对误差就越小。那么，为了让日震学真正发挥作用，需要观测多少个周期呢？答案是一万个以上。对于“五分钟振荡”来说，一万个周期约为35天，因此需要连续观测35天以上。

粗看起来，这似乎不是什么大不了的要求。科学研究花费几个月、几年甚至更长时间都是家常便饭，我们在第9章中介绍过的探测太阳中微子的实验就动辄持续几年以上。但对“五分钟振荡”的观测却有一个问题，那就是太阳只有在晴朗的白天才能被观测到，一到晚上就没有了，而光子又不像中微子那样能够穿透整个地球。因此连续35天以上的观测绝不是轻而易举的事情，非但不轻而易举，经这么一说，简直要变成“不可能任务”了。幸运的是，情况也没那么糟，因为地球上有些地方的太阳是可以连续半年悬挂在天上的，那就是两极附近的地区，那里有

所谓的极昼（polar day）。

看来，要想对“五分钟振荡”进行精密观测，必须到极地去。极地的环境那是出了名的恶劣，温度低就不用说了，最麻烦的是，到了极地也不一定就能进行连续观测，因为极昼不等于晴天，冰雾（ice fog）、风暴（storm）、卷云（cirrus cloud）等都会造成观测的中断。而且极地的生活条件那是相当的艰苦，通信联络那是相当的不便。到那里去做研究，套用一句网络流行语来说，叫做“哥做的不是研究，而是寂寞”。即便如此，依然有一些天文学家心甘情愿地去过寂寞日子。1980年1月，两位法国天文学家格雷克（Gerard Grec）和福塞特（Eric Fossat）赴南极进行了观测，可惜运气一般，只获得了5天的连续观测时间。不久之后，美国基特峰国家天文台的天文学家哈维（Jaqck Harvey）和杜瓦尔（Tom Duvall）也去了南极，在一个小得像清洁间的房间里一住就是两个月。不仅如此，他们两人后来还多次重返南极，其中有一次获得了长达65天的连续观测时间。这些研究为日震学的崛起立下了汗马功劳，也再次并且非常漂亮地证实了乌尔里克的那些抛物线（图12.2）。

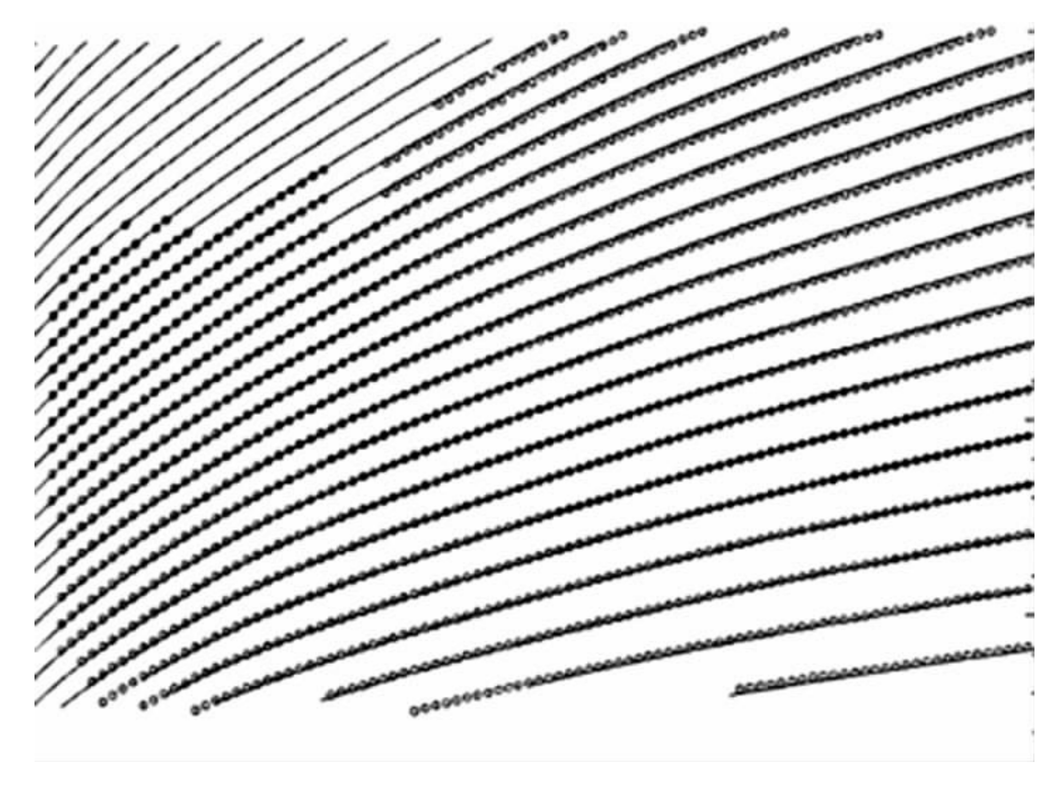


图12.2　“五分钟振荡”的南极观测结果

利用极昼并不是获得长时间连续观测的唯一手段。熟悉历史的读者想必知道，当年英国殖民地遍布全球时曾号称“日不落帝国”，因为太阳在任何时候总能够照到它的某一块殖民地上。与这种帝国的原理相类似，我们也可以用分布于世界各地的若干观测站来构筑一个“日不落”观测系统。1979年，英国伯明翰大学（University of Birmingham）的科学家率先通过两个观测站实践了这种方法。自20世纪90年代中期开始，美国牵头组建了一个更大的“日不落”观测系统，由位于加那利群岛、西澳大利亚、美国加州、美国夏威夷州、印度及智利的六个观测站组成，称为太阳全球振荡监测网（Global Oscillation Network Group，GONG）。

与太阳全球振荡监测网的建设几乎同时，一种更优越的观测手段也开始付诸实施，那就是人造卫星。这种手段的优势是不言而喻的，建在地面上的观测站，无论是两极附近的观测点，还是“日不落”的观测网，都免不了要“看天吃饭”。只有翱翔于九天之上的卫星，才能真正自由自

在地对太阳进行连续观测。1995年，美国国家航空航天局（NASA）发射了一颗“太阳和日球层探测器”（Solar and Heliospheric Observatory，SOHO）。该探测器定位在太阳与地球之间的所谓第一拉格朗日点[9]（first Lagrangian point，L_1）上，与地球公转同步地绕着太阳运转，可以常年不断地观测太阳。利用这样的现代手段，对“五分钟振荡”的观测精度已经达到了百万分之一以上的量级。

那么，日震学研究取得了什么成果呢？最重要的成果就是对标准太阳模型进行修正及检验。我们在前文中提到过，太阳模型看似粗糙，实际上却相当精密。之所以如此，除了它对物理原理的运用相当缜密外，另一个很重要的原因，就是标准太阳模型中的参数大都经过了日震学手段的检验及修正[10]。

日震学研究所取得的另一项重要成果，是对太阳内部自转速度的分布作出了精密推断。与像地球这样的固态星球不同，太阳内部不同深度、不同纬度处的自转是不同步的。日震学研究不仅发现并测定了这种不同步性，而且还发现这种不同步性在对流区底部以下的一个被称为差旋层（tachocline）的薄层中，非常突然地转变成了刚性自转。这一点是由前面提到的罗兹和德伯纳共同发现的，这两人因验证乌尔里克的预言而“撞车”后，很快化“敌”为友成为了合作者，联手展开新的研究。他们所发现的这个差旋层虽然很薄，而且埋藏得很深，却很可能有着极大的重要性。一般认为，发生在差旋层中的这种自转突变现象与太阳磁场的产生有可能存在密切关联，但很多细节仍有待进一步研究。有读者可能会问：太阳的自转方式为什么会在差旋层那样一个薄层内发生突变呢？很遗憾，这是有关太阳的诸多谜团中的一个，迄今尚无答案。

除上述成果外，日震学研究还有一个引人注目的方面，那就是能够

预报所谓的太阳活动（solar activity）——即诸如黑子（sunspot）和耀斑（flare）那样的现象。那些现象有时会对地球造成影响，比如耀斑有时会干扰无线电通信。日震学为何能预言太阳活动呢？因为它可以探测到太阳背面的活动。它为何能探测到太阳背面的活动呢？因为那些活动大都跟太阳磁场有关，而太阳磁场会使太阳物质产生压缩、沉降等作用，那些作用又进而会影响到声波的传播，使得从太阳正面传往背面，并经背面反射回正面（整个过程约需6～7小时）的声波比正常情况提前十来秒钟。通过对这一点的观测，天文学家们能相当准确地描绘出太阳背面的活动。由于太阳自转一圈需要二十几天，因此描绘出太阳背面的活动，意味着天文学家们有一定的可能性（请读者想一想，为什么只是可能性？）提前若干天预言那些转到正面后会对地球产生影响的太阳活动。这或许是日震学研究中最具实用意义的一面。

最后，让我们将第11章末尾的表格补全，作为对当时所留问题的回答：

区域名称	范　　围	主要现象	检验方法
核心区	0～17万千米	核聚变反应	探测各个能区的太阳中微子及利用日震学手段
辐射区	17万～49万千米	以辐射为主的能量传输	利用日震学手段
对流区	49万～69.5万千米	以对流为主的能量传输	观测太阳表面的各种“米粒”及利用日震学手段

[1]感兴趣的读者请思考这样一个问题：当我们认为一条谱线的“波长和频率因多普勒效应而发生偏移”时，如何确定它到底是哪条谱线的波长和频率发生了偏移？又如何排除另外的可能性，比如波长和频率未发生偏移的新谱线呢？

[2]有少数文献将太阳大气层定义为光球层以上的部分，不含光球层。

[3]有些文献将温度最低层视为色球层的一部分。

[4]太阳物质中的声波波速大致与温度的平方根成正比。

[5]确切地说是往两个区域的分界面方向偏折，但由于实际计算中太阳物质的分布被视为标准的层状分布（比如同心球面分布），分界面方向与太阳表面方向基本一致，因此称为水平方向。

[6]太阳物质中的声波截止频率大致与温度的平方根成反比。之所以存在截止频率，是因为当声波的频率太低（即振动太缓慢）时，太阳物质将会有足够的时间自我调节，以抵消声波造成的扰动，从而使声波迅速衰竭。

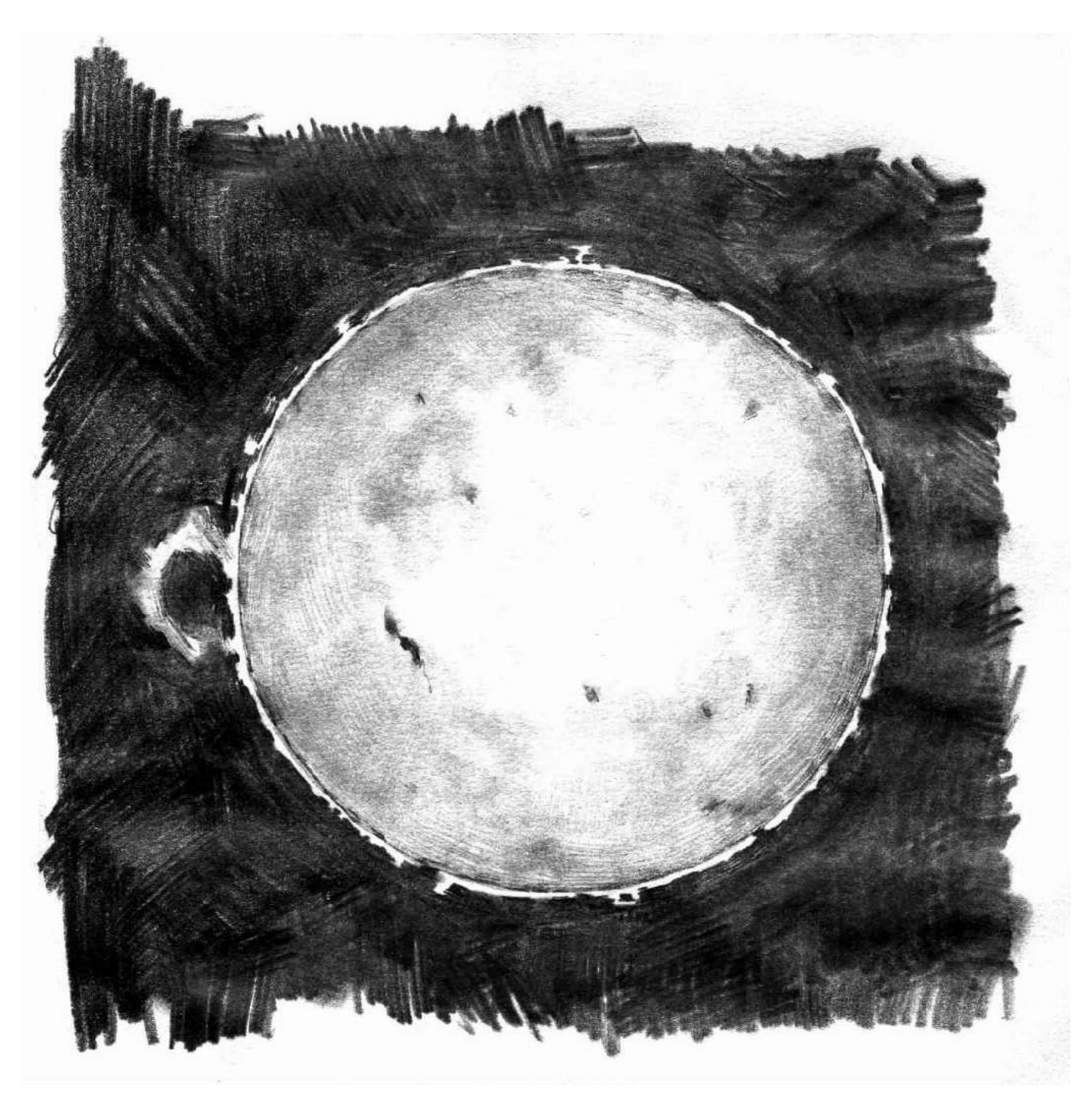
[7]当然，这是理想情况，声波在对流区顶部的实际反射不是百分之百的，而是有一部分会“漏网”，人们在大气层中观测到的振荡就是这部分“漏网之鱼”造成的。

[8]其他类型的一个例子是重力波，也称为g模（g来自“重力”的英文gravity）；其他周期的一个例子是所谓的“160分钟振荡”（现代观测并未证实这一周期，因此不排除该周期是以前观测留下的错误）。另外要提醒读者注意的是，日震学观测需要高超的数据分析能力，因为

我们观测到的振荡实际上是数以百万计的不同模式振荡相互叠加的结果，必须使用高超的观测技术及数学手段才能提取出有用数据。

[9]第一拉格朗日点是太阳与地球连线上距地球约150万千米的一个点，该点上的卫星在太阳与地球引力的共同作用下，将会以与地球相同的公转周期绕太阳运动，从而始终保持在太阳与地球的连线上。

[10]这种修正的一个著名例子是对对流区厚度的修正，标准模型原先采用的对流区厚度偏小。



绘画：张京

13　谜团锦簇的太阳大气层

我们的太阳故事到这里已接近尾声了。在本章中，我们将探索太阳的最后一个组成部分：大气层。那是一个肉眼通常难以窥视的地方，但利用各种仪器的帮助及日全食的机会，天文学家们已经对它进行了颇为细致的观测。观测的结果如何呢？概括地说是四个字：谜团锦簇。事实上，在这个谜团锦簇的太阳大气层中，我们将要面对的谜团可能要比在前面各章中遇到的加起来还多。这是因为太阳大气层比太阳内部更复杂吗？未必。更有可能的原因是我们对太阳大气层的观测远比对太阳内部来得细致。有一句西方俗语说得好：魔鬼存在于细节之中（The devil is in the details），太阳大气层无疑就是一个例子。

我们在第12章中已经提到过太阳大气层的某些部分。比如厚度约500千米的温度最低层，厚度约2 000千米的色球层等。本章的探索将从色球层开始，因为它将带给我们第一个谜团——色球层反常高温之谜。

色球层这一名称来自希腊文词根“chromos”，含义是颜色（color）。我们在第6章中介绍过的太阳元素“氦”就是在色球层的光谱中被发现的。色球层的一个很引人注目的特点，就是一反太阳内部温度自核心向外逐层递减的趋势，出现了外层温度比内层更高的奇怪现象，即所谓的色球层反常高温。这种反常高温的原因是什么呢？或者更具体地说，它所需的能量从何而来呢？科学家们进行了长期研究，并提出了一些可能的机制。目前看来比较靠谱的机制主要有两种：一种是声波加热，另一种是阿尔文波（Alfvén wave）加热。

声波加热顾名思义，就是认为色球层反常高温所需的能量来自于声

波。太阳上的声波我们在第12章中曾经介绍过，它们以太阳的肚子为谐振腔，形成很多模式，并且如第12章的注释所说，在被对流区顶部反射时会有一部分“漏网”，形成诸如“五分钟振荡”那样的大气层振荡现象。那么，那部分“漏网之鱼”的最终命运会如何呢？答案是：很悲惨。一般认为，色球层就是它们的葬身之地，而它们葬身之时留下的唯一“遗产”就是能量——维持色球层反常高温所需的能量。这就是所谓的声波加热机制。不过这种机制有一个显著的缺点，那就是只在能量需求不大的色球层下部才比较有效，在真正急需能量的色球层上部却不够“给力”。计算表明，大部分声波根本没到色球层上部就“出师未捷身先死”了。

那么色球层上部高温所需的能量又来自何方呢？一般认为，也是来自一种波，叫做“阿尔文波”（Alfvén wave）。那是一种沿着下文将要介绍的太阳磁场中的所谓磁通量管（magnetic flux tube）传播的波，是瑞典物理学家阿尔文（Hannes Alfvén，1908—1995）提出的。研究表明，这种阿尔文波可以远比声波传得更高，从而可以为色球层的上部送去“温暖”，这就是所谓的阿尔文波加热机制。不过，声波加热与阿尔文波加热这两种机制的“高低搭配”是否算是解决了色球层反常高温之谜呢？目前还没人能打保票，因为很多细节仍有待完善。

反常高温并不是色球层带给我们的唯一谜团，色球层中的另一种现象也对天文学家们提出了挑战，那就是所谓的针状物（spicule）早在1877年，意大利天文学家塞奇（Angelo Secchi，1818—1878）就在色球层的边缘上发现了这种形如尖针的东西。后来的观测证实，那是一些底面积与四川省差不多大，高度相当于几百个珠穆朗玛峰的“小火舌”（图13.1）。这样的“小火舌”在整个色球层中通常有六七万个之多，它们的温度在1万度左右，底部物质以每秒几十千米的速度向上升腾。这些“小

火舌”的成因也是一个谜团，一般认为，它们与“五分钟振荡”有着密切关系，但很多细节同样有待完善。

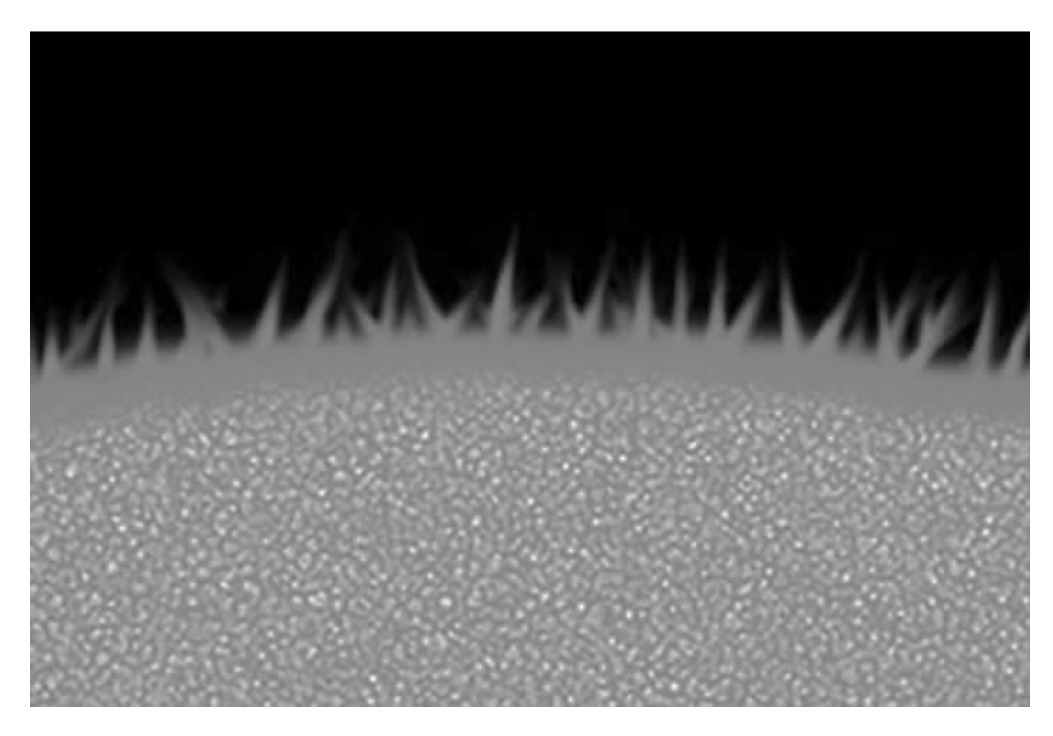


图13.1色球层中的“小火舌”——针状物

不过，我们对色球层的理解虽然是“缺点错误在所难免”，总体来说还算差强人意（这个词常被误用为“不能使人满意”，这次是按正确的含义来用，表示“勉强使人满意”）。与之相比，色球层以上部分的麻烦可就大多了。经过一个厚度200千米左右的“薄如蝉翼”的过渡区（transition region），太阳大气层的温度剧增到了100万度以上。那里便是日全食相片中最吸引眼球的东西——日冕（corona）。日冕这一名称的希腊文词根表示的是王冠（crown）。我们小时候画太阳时，通常会画上一些象征阳光的锯齿状轮廓，日冕就有点像那轮廓，只是形状要复杂得多。日冕不仅形状复杂，其他方面也很复杂，比如它的密度分布极不均匀，有些地方甚至有巨大的空洞，称为“冕洞”（coronal hole）；它的温度分布也同样极不均匀，平均为100万～300万度，局部的低温和高温则比比皆

是。[1]

日冕给天文学家们带来的谜团是显而易见的，那就是它为什么会有如此高的温度？这个谜团与色球层的反常高温之谜如出一辙，“难度系数”却高得多。因为声波与阿尔文波这两种为色球层送去“温暖”的加热机制，对于“高高在上”的日冕来说，都显得有些“力不从心”。这其中声波加热机制连色球层上部都难以到达，自然就甭提了。阿尔文波的情况要强一些，它能为日冕提供一部分能量，但数量却不够。因此，解决日冕高温之谜还需要有其他机制的加盟，这其中比较有希望的一种机制，是美国天体物理学家帕克（Eugene Parker，1927—）在1988年提出的所谓“纤耀斑”（nanoflare）加热机制。按照这种机制，日冕中常常会发生微型爆炸，即所谓的“纤耀斑”，这是我们将在下文中介绍的耀斑（flare）的“迷你版”，威力“仅”相当于几百个氢弹，次数却很频繁，足以为日冕送去大量“温暖”，甚至有可能是日冕能量的主要来源。当然，这后一点目前谁也说不准。一般认为，太阳上不同规模耀斑的数量分布与自然界的很多其他随机现象一样，近似地满足所谓的幂律分布（即数量与规模之间满足近似的幂函数关系）。按照这种分布，“纤耀斑”的存在是不成问题的，数量也应该是比较大的，但是否大到能为日冕提供足够能量的程度，则与幂律的幂值有关，人们对之尚有争议。纤耀斑加热机制如此，其他机制的情况也大致相若，各有各的争议之处。那些争议不解决，日冕的高温之谜当然也就无法解决。

日冕不仅温度极高，体积也极为庞大。看过日冕相片的读者想必都对日冕的体积留有深刻印象。从相片上看，日冕有时能延伸到几个太阳半径处，其体积之大甚至超过了太阳本身。与地球大气层（厚度约100千米）的体积仅为地球体积的百分之几相比，日冕的体积无论绝对值还是相对值都是极为巨大的。但这是否就是太阳大气层的边缘呢？答案是

否定的。事实上，早在20世纪50年代中期，英国天文学家查普曼（Sydney Chapman，1888—1970）就曾提出，日冕虽然看上去只延伸到几个太阳半径处，但如此高温的气体是不可能被禁锢在那样“小”的范围之内的。据他估计，日冕应该能一直延伸到地球轨道以外。（感兴趣的读者请思考一下，这与地球没有被“烤焦”这一显而易见的经验事实是否矛盾？）

与查普曼这一看法的提出几乎同时，德国天文学家比尔曼（Ludwig Biermann，1907—1986）也提出了一个与太阳外围有关的想法，那就是我们如今称之为太阳风（solar wind）的想法。比尔曼的想法源于一个众所周知的现象，即彗星的尾巴——彗尾（comet tail）——总是沿背离太阳的方向伸展的，哪怕当彗星本身背离太阳运动时也是如此，仿佛是被一股来自太阳的“风”吹起来的。[2]

查普曼与比尔曼的想法看起来很不相同，在空间范围上却存在巨大的重叠，它们彼此间是否有关联呢？上文提到过的美国天体物理学家帕克作出了肯定的回答。他的研究表明日冕不可能是一团宏观上静止的弥散气体，而应该是一种向外运动的“气流”——即“太阳风”。这样他就把查普曼的巨型日冕与比尔曼的太阳风联系了起来，并且他为太阳风构筑了一个具体的模型。有意思的是，帕克这项如今被视为太阳风研究的开山之作的重要研究，在当年却遭到了审稿人的拒绝，后来亏得著名美籍印度裔天体物理学家钱德拉塞卡（Subrahmanyan Chandrasekhar，1910—1995）的慧眼相识，才得以发表。

有关太阳风的猜测很快就得到了观测证实。自20世纪50年代末起，苏联的“月球”（Lunar）系列航天器、“金星一号”（Veneral）行星探测器，以及美国的“水手二号”（Mariner2）行星探测器都先后观测到了太

阳风。[3]如今我们知道，太阳风是太阳大气层外围的一种相当显著的现象，每秒钟从太阳上带走将近200万吨的物质。当然，这一乍看起来很惊人的数量相对于太阳的巨大质量来说只是“毛毛雨”（感兴趣的读者可以利用本书提供的数据，估算一下这种“毛毛雨”可以“下”多少年）。太阳风除了造成彗尾的“轻舞飞扬”外，更显著的结果是在太阳周围的星际介质中“吹泡泡”，被它吹出的泡泡称为“日球层”（heliosphere），其边缘通常被广义地视为是太阳大气层的边缘。那么这个边缘究竟在哪里呢？一般认为，是在离太阳100～200天文单位（即150亿～300亿千米）处。这个距离远远超过了所有太阳系已知行星的轨道半径，因此从某种意义上讲，我们一直都生活在太阳的大气层中——不仅我们如此，所有已知的太阳系行星都是如此，真所谓“普天之下，莫非王土”。[4]

作为谜团锦簇的太阳大气层的成员，色球层和日冕都给天文学家们出了难题，太阳风也不例外。迄今为止，人们尚未找到一个能全面描述太阳风特征的模型。观测表明，太阳风的“风速”约在每秒200～800千米之间。其中“风速”在每秒400千米以下的被称为慢太阳风（slow solar wind），“风速”在每秒400千米以上的则被称为快太阳风（fast solar wind）。太阳风模型必须解释，却迄今尚不能给出满意解释的一个老大难问题，就是这两者——尤其是快太阳风——的起源。一般认为，快太阳风粒子的起源需要一个合适的加速机制，这种机制与日冕的加热机制很可能存在密切关系，甚至有可能是同源的（比如阿尔文波有可能对两者都起着重要作用），但具体如何，还有待进一步研究。

以上就是对太阳大气层各主要成员的大致罗列。小结一下的话，那么太阳大气层底部有一个很“凉快”薄层叫做温度最低层，自那以上温度不降反升，在温度不算太高的色球层中，有几万个底面积“只有”四川省那么大，高度“只有”珠穆朗玛峰的几百倍那么高的“小火舌”。在那以

上，经过一个“薄如蝉翼”的过渡区，是体积大得惊人的日冕，那里的物质极度稀薄，温度却高得邪乎，还时不时地有几百个氢弹炸来炸去。再往外，则是以比火箭还快几十倍的速度劲吹到几百亿千米外的太阳风。这就是太阳大气层的日常景观，这种景观有一个很文雅的名称，叫做“宁静太阳”（quiet sun）——别揉眼睛，您没看错，是叫做“宁静太阳”。

“宁静”的意思就是没什么“活动”。“宁静”时尚且如此，那么有“活动”时又会怎样呢？

太阳大气层中的各种“活动”有一个很没创意的共同名字，就叫“太阳活动”（我们在第12章末尾已经提到过这一名称）。在太阳活动中，资格最老的是黑子（彩图12）。早在两千多年前，中国古籍中就出现了有关黑子的记载，西方人记载黑子也有一千多年的历史。不过黑子的发现虽早，长期以来却很少有人认清它的真面目，而常常把它当成所谓的行星凌日（planetary transit），即行星从太阳前面经过。直到17世纪初，才由伽利略明确提出黑子是太阳自身的“污点”。这个看似稀松平常的结论，对当时的“天贵地贱”观念给予了当头一击（参阅第3章）。[5]不仅如此，这一结论还给另外一些人造成了困扰，比如我们在第8章中提到过的英国天文学家赫歇耳，就曾被黑子的“黑色”所误导，而以为太阳表面很凉快，甚至有可能存在生物。

那么这个蒙蔽了大伙儿几百年，甚至把赫歇耳那样的著名前辈都给误导了的黑子到底是什么东西？它为什么会出现在光芒万丈的太阳上呢？这些谜团直到20世纪初才逐渐揭开面纱。首先被搞清楚的是，黑子展现的绝不是赫歇耳所幻想的有可能有生物栖息的凉快表面，它的温度实际上高达4 000度左右（请读者想一想，我们介绍过的哪一种手段可

以使我们得到这一信息），足以熔化素以耐高温著称的金属元素钨。黑子之所以呈现黑色，完全是因为它不幸生在了一个比它更“白”的环境里（黑子周围太阳物质的温度比它高了一千多度），从而被衬黑了。如果我们能将黑子周围的阳光全部滤掉的话，黑子非但不黑，反而会呈现出耀眼的光芒。另外，黑子看上去很小（黑子的英文名字中的“spot”和中文名字中的“子”都有“小”的意思），那也只是相对于太阳的庞大而言的，它的实际块头可不小，即便小黑子的面积也有新疆那么大，大黑子更是可以吞下整个地球。

黑子的“黑”和“小”这两个品性算是被搞清楚了，但它为什么能“出高温而不染”，维持这么“低”的温度呢？这可就不是一个简单问题了。它所牵扯到的是太阳大气层中最重要的幕后推手：太阳磁场。

1908年，美国天文学家黑尔（George Hale，1868—1938）通过光谱学手段发现，黑子中存在强度约为0.3特斯拉（0.3 T）的磁场。[6]这是很强的磁场，比地球磁场强一万倍左右，也比太阳表面的平均磁场强得多。这一强磁场的存在为揭开黑子的“维稳”之谜提供了线索。这线索就是：“维稳”离不开“警力”，而磁场恰恰可以充当这种“警力”，因为它会产生一种特殊的压强，叫做磁场压。正是在磁场压的帮助下，温度较低（从而内部压强也较低）的黑子才能抗衡住外部物质的高压而维持稳定（黑子一般能维持几天至几星期，在太阳大气层中算是比较稳定的结构）。进一步的计算还表明，强磁场对太阳物质的对流会产生抑制作用，使得能量无法经由对流有效地传至黑子内部，这就解释了黑子温度偏低的原因。更令人欣慰的是，在理论上还可以证明，太阳物质的运动会通过一种所谓的“对流坍塌”（convective collapse）现象，而自发地造成某些区域的磁场强度增加。这种磁场强度增加的区域通常呈管状分布，被称为“磁通量管”。磁通量管伸出或插回太阳表面的地方通常就会

形成黑子。由此可见，磁场的存在除了能解释黑子的主要特征及“维稳”机制外，还可以解释它的成因。不仅如此，由于磁通量管的伸出与插回总是“成双成对”，且极性相反的，它还可以解释有关黑子整体分布的一个重要特征，那就是黑子常常成对出现，且每对黑子的磁场极性彼此相反。

但是，磁场的存在虽然解释了黑子的成因、主要特征及“维稳”机制，却不等于说黑子就没有带给我们其他谜团了，那样的谜团其实还不少。细致的观测表明，黑子有着复杂的结构，除了被称为“本影”（umbra）的黑色中央区域夕卜，半径在5 000千米以上的大黑子四周通常还有所谓的“半影”（penumbra），它们的颜色较浅，包含了很多纤维状结构。更仔细的观测还表明，本影中有时会出现亮点，半影内则有时会出现旋涡状结构，在黑子消亡前，本影内有时还会出现明亮的桥状结构。这些细致结构的成因及演化目前都还是有待探索的谜团。

太阳活动的另一个重要成员叫做耀斑（彩图13）。如果说黑子是一种很低调的太阳活动，那么耀斑就恰好相反，它极为张扬，是“爆炸式”的活动——这可不是比喻，因为它实际上就是爆炸。一个大耀斑通常可以释放出几十亿亿亿焦耳的能量，相当于一百亿个百万吨级氢弹同时爆炸！在大耀斑爆发时，太阳大气层的局部温度可以在短时间内升高到2 000万～3 000万度，比太阳核心的温度还高。耀斑的威力极为惊人，虽然发生在一亿五千万千米之外的太阳上，却足以对地球产生显著影响。事实上，1859年9月，人类记录下的第一个大耀斑就是以它对地球的显著影响而引起人们的注意的，它所发射的带电粒子流猛烈撞击地球磁场，产生的极光（aurora）一直延伸到赤道附近，使无数没有机会前往极地的人领略了一次天象奇观。随着技术的发展，耀斑对地球的影响得到了越来越多的显现机会。1984年4月，一个普通耀斑中断了美国

总统里根（Ronald Reagan，1911—2004）的“空军一号”专机与地面的通信，使美国情报部门大为紧张，以为是苏联人在做手脚。2006年12月，一个小耀斑将正在进行舱外作业的国际空间站的宇航员逼入“发现者”号航天飞机仓皇躲避（他们实际上还是慢了一步，所幸那只是小耀斑，他们所受的辐射剂量不大）。

耀斑给我们提出的问题是显而易见的：那就是它为什么会发生？它的能量来自何方？科学家们对这些问题进行了长期研究。与黑子一样，一般认为耀斑的发生也跟太阳磁场有着密切关系。一种目前比较流行的观点认为，耀斑的发生很可能是磁通量管的重组造成的。太阳上的磁通量管就像橡皮筋一样，可以通过应力等形式储存能量（上文提到的阿尔文波之所以能沿磁通量管传播，也正是因为这一特性）。随着太阳物质永不停息的运动，磁通量管会被拉伸、扭曲、缠绕，这些过程会大大增加储存在磁通量管中的能量。但这种过程是不可能永远持续下去的，因为能量越高的状态就越不稳定，最终将会有一个时刻，如同橡皮筋突然断裂一样，磁通量管发生重组，由拉伸、扭曲、缠绕后的复杂状态一举重组回相对简单的状态，并将因拉伸、扭曲、缠绕而储存起来的能量在很短的时间内释放出来，由此形成的就是耀斑。这个过程有点像小孩搭积木，随着积木越搭越高，势能越积越多，它会变得越来越不稳定，最终会有一个时刻，积木突然垮塌，原先储存在积木中的势能被突然释放出来（释放的形式之一就是撞击桌面或地面发出的轰然之声）。

这种机制得到了一定程度的观测支持。人们发现，耀斑通常发生在极性变化较为复杂的黑子区域附近，那里不仅有强磁场，而且磁通量管的分布较为复杂，容易发生上述机制所要求的拉伸、扭曲、缠绕等过程。但这种机制也并非没有问题。比如前面提到的帕克在20世纪60年代曾对磁通量管的重组进行过估算，结果发现那需要几小时甚至几天的时

间才能完成，而耀斑的能量释放过程往往持续不到一分钟，两者大相径庭。为了解决这一问题，科学家们提出了许多修正方案，比如有人提出磁通量管的重组只需发生在一小段而不是整段上，从而能在短得多的时间内完成。也有人提出磁通量管在重组前会破碎成许多小圈，从而大大增加接触面积，使重组得以“提速”，等等。总之，方案人人会提，各有不同巧妙，但越是巧妙的方案所需的观测证实通常也越精密，其中很多都超出了目前的观测能力，因此耀斑的发生机制到目前为止还是一个谜，探索的道路还很漫长。

除耀斑外，太阳大气层中的另一种爆发现象近来也受到了越来越多的关注，那就是所谓的日冕物质抛射（coronal mass ejection）。一定规模的日冕物质抛射的发生频率从几天一次到一天几次不等，它们与耀斑的主要差别——顾名思义——是会抛射出大量的“物质”，主要是带电粒子，数量约有几十亿至上百亿吨，飞行速度约为每秒几百千米，所携带的动能与大耀斑的总能量相近。[7]这些质量相当于几万艘万吨巨轮的带电物质若不幸与地球相遇，将会造成大型的地磁暴，其威力往往要比耀斑造成的地磁暴更厉害——这也正是人们越来越关注日冕物质抛射的主要原因。

1989年3月，一次小规模日冕物质抛射弓|发的地磁暴，造成了加拿大魁北克省电力系统的崩溃，并使得极光范围一直延伸到美国南部的得克萨斯州，很多人甚至担心美苏双方的军事通信系统会因地磁暴的干扰而触发核大战。小规模日冕物质抛射尚且如此厉害，大规模日冕物质抛射倘若击中地球，结果更是不堪设想。2009年5月，美国国家海洋与大气管理局（NOAA）发布了一份太阳风暴（solar storm）警报，认为2013年有可能会是太阳活动较频繁的年份，其中某些太阳活动的规模有可能不在1859年那次大耀斑之下。这其中最令人担忧的就是大规模日冕

物质抛射击中地球的可能性。有人也许会说：1859年的大耀斑不就是一次天象奇观吗？并没有造成严重后果啊？是的，1859年的大耀斑确实没有造成严重后果，但今天的人类社会早已不是1859年那样子了。我们今天引以为傲的现代文明已经极大地依赖于各种各样的电子及电力设备。在这种情况下若被大规模日冕物质抛射所击中，后果将远不是天象奇观那么浪漫，而很可能是灾难性的，比如很可能出现全球性的电力中断（图13.2）。现代社会是如此彻底地依赖电力，就连像加油站那样以提供其他能源为目的的系统，也已经离不开电力。一旦发生全球性的电力中断，后果将不堪设想，那时想要修复哪怕一座爆炸了的变压器都会极度困难。科学家们估计，那样的灾难倘若发生，人类恐怕要用几年的时间才能逐渐恢复，在此期间，连食物和水的供应都会出现困难，其结果将是比任何大型战争或重大瘟疫还要可怕得多的生命损失，就连发达国家也难以幸免（事实上，在那样的灾难面前，发达国家反而有可能更脆弱，因为它们比其他国家更依赖于电子及电力设备）。



图13.2　太阳风暴假想图

当然，这只是最坏情形，即便真的发生大规模日冕物质抛射，它直接击中地球的概率也并不大，但想到人类只能仰仗大自然的概率恩赐来侥幸度日，毕竟是一种很无奈的感觉。太阳对于我们实在太重要了，为今后有可能发生的来自于太阳的灾难预做准备，是除好奇心之外，人类研究太阳的一个最重要的动机。事实上，最近几年来，人们已经开始建立所谓的“太空气象”（space weather）系统，试图对主要由太阳活动引起的地球附近的空间环境变化进行研究及预测，以服务于我们这个脆弱星球上的脆弱系统。但到目前为止此类系统尚不能作出真正意义上的预测（比如前面提到的美国国家海洋与大气管理局有关2013年太阳风暴的警报不仅在时间上是粗略的，也规模上也完全有可能是错误的）。它所能做的真正可靠的事情，只是利用带电粒子从太阳运动到地球所需的几天时间，通过已经发生的太阳活动，来为我们提供几天的预警时间而已。

那么，日冕物质抛射是如何发生的呢？很不幸，这也是一个未解之谜。人们提出了很多理论，但各有各的问题。比如很多人曾经认为，日冕物质抛射与耀斑有着直接关联，甚至完全就是由耀斑造成的。但后来的研究发现，很多大耀斑并不导致日冕物质抛射，而某些小规模的日冕物质抛射则似乎没有与之相伴的耀斑。因此日冕物质抛射与耀斑之间看来并不存在可靠的因果关联。但一般认为，两者之间虽没有因果关联，却也绝非毫不相干。佐证这一点的最好证据，就是几乎所有大规模的日冕物质抛射都有与之相伴的耀斑。另外，日冕物质抛射与耀斑一样，都几乎铁定是与太阳磁场存在极密切的关系，而且极有可能都是磁通量管的重组造成的（事实上，日冕物质抛射很可能是整段磁通量管遭到“抛弃”所致）。只不过究竟什么样的磁通量管分布会造成耀斑，什么样的磁通量管分布会造成日冕物质抛射，目前还不得而知。

从黑子到耀斑，再到日冕物质抛射，太阳活动的形式是丰富多彩的。那么，在这些活动中有没有什么共同特征呢？有，那就是太阳周期（solar cycle，图13.3），那也是我们在结束走马观花般的本章前，最后要介绍的话题。

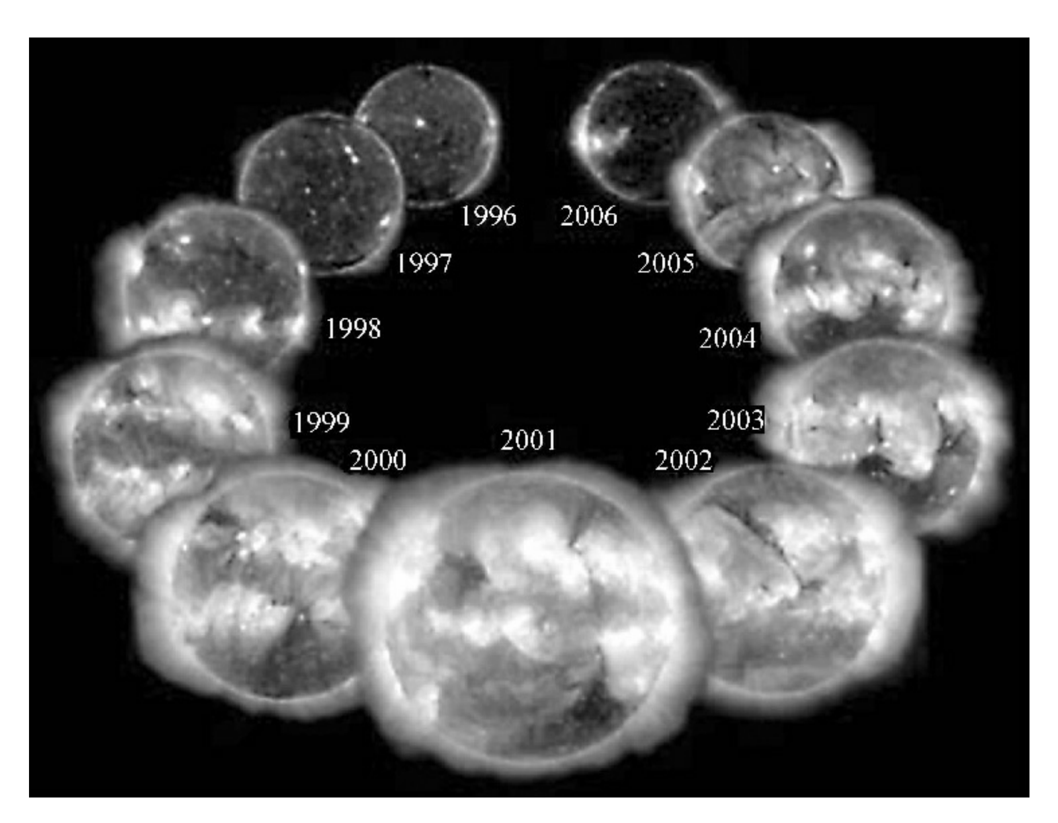


图13.3　太阳周期（顶端为极小年，底部为极大年）

太阳周期是德国天文学家施瓦布（Heinrich Schwabe，1789—1875）通过对太阳黑子数目长达17年的持续观测，并借鉴历史数据所发现的。它最初的含义是黑子数目的变化周期。但后来的研究发现它同时也影响着耀斑、日冕物质抛射等其他太阳活动，甚至对太阳的光度及太阳风的强弱也有一定影响，可以说是所有太阳活动的共同特征。另一方面，在揭示出太阳周期所具有的广泛影响力的同时，它作为周期现象的品质却在下降。现代观测表明，太阳周期并不是严格意义下的周期现象，它的平均值约为11年[8]，但有时可以短至9年，有时又可以长达16

年，甚至还出现过长达几十年没有显著活动的所谓“蒙德极小期”（Maunder Minimum）。不过，尽管有这样的起伏，太阳活动的规律性仍是足够显著的，起码存在着近似意义上的周期性，而绝不是随机现象。在一个太阳周期中，太阳活动最少的年份称为太阳活动极小年（solar minimum），太阳活动最多的年份则称为太阳活动极大年（solar maximum）。前面提到的美国国家海洋与大气管理局有关太阳风暴的警告，其实也是对太阳活动极大年的预测，即认为2013年很可能是即将来临的一个太阳活动极大年。[9]

尽管太阳周期不是严格意义下的周期，但作为一种显著的近似现象，它的存在依然是需要解释的。为了寻找这种解释，科学家们付出几十年的艰辛努力，可惜的是——读者们一定猜到我要说什么了——迄今为止这也仍是一个未解之谜。

当然，这并不是说几十年的努力毫无成果。相反，成果不仅有，而且还不小。在这里我们介绍其中较受青睐的一个，即所谓的“发电机机制”（dynamo mechanism）。在介绍之前，首先让我们一同分析一下，解释太阳周期的切入点应该在哪里？大家请不要拍砖，这并不是拿一个研究性的问题来卖弄知识或为难读者。事实上，对太阳周期的具体解释虽然是极困难的研究课题，切入点的选择却是相当显而易见的。通过本章的介绍，我们已经知道太阳活动有一个共同的幕后推手，那就是太阳磁场。而我们前面刚刚介绍过，太阳周期是所有太阳活动的共同特征。既然一组现象有一个共同的幕后推手，那么它们的共同特征最有可能归因于什么呢？当然就是那个共同推手，即太阳磁场。因此，解释太阳周期的切入点应该是太阳磁场，这也正是发电机机制的切入点。发电机机制的精髓之处，就是将太阳磁场本身的演化也纳入了解释范围之内，从而在很大程度上具有统领整个领域的潜力。

发电机机制出现于20世纪60年代，此后经历了几次起落。它的早期设想是这样的：在太阳活动的极小年中，太阳内部存在着弱磁场（像太阳这样的巨型等离子气团中存在弱磁场并不是难以想象的事情，不存在反倒是难以想象的）。这种场在太阳内部主要由南极指向北极，被称为极向场（poloidal field）。极向场在太阳内部自转不均匀性的带动下，将会发生扭曲，使磁通量管沿赤道方向遭到拉伸，形成所谓的环形场（toroidal field）。随着扭曲的加剧，环形场的强度会持续增强。计算表明，当环形场的强度增加到一定程度时，磁通量管将会出现上浮的现象。不仅如此，磁通量管在上浮过程中还会产生新的极向场[10]，从而构成极向场与环形场之间的相互支撑。当磁通量管浮出太阳表面时，将如上文说过的那样，在伸出和插回太阳表面的地方形成一对磁场极性相反的黑子。粗略的分析表明，这种机制有一个很漂亮的地方，那就是可以解释有关黑子分布的所谓斯波勒定律（Spörer's law），即在每个太阳周期中，自极小年到极大年，太阳黑子几乎总是首先出现在高纬度区域，然后向低纬度区域扩张，而且南北半球上的黑子对有着相反的极性。那么太阳周期又是如何出现的呢？是因为磁通量管的相互湮灭。当南北半球那些极性相反的黑子对扩张到赤道附近时，磁场方向相反的磁通量管会相互湮灭，从而使磁场分布逐渐回到最初时的弱磁场状态——这就是一个新周期的开始。

这些结果初看起来很令人振奋，不仅对太阳周期作出了说明，还附送了对斯波勒定律的解释，简直是“买一送一”。可惜好景不长，问题很快就出现了，而且恰恰就出在那附送的部分上。原来，发电机机制的早期研究有一个先天不足，那就是对太阳内部的自转状况一无所知。当然，在那种早期研究中，无知有无知的快乐，那就是便于作假设，因此当时人们对太阳内部的自转状况作了相当任意的假设，目的之一就是解释斯波勒定律。但不久之后，我们第12章所介绍的日震学手段就粉墨登

场了，它无情地粉碎了那些无知年代的快乐假设，因为它所探测到的太阳内部的实际自转状态与早期所假设的并不一致。那么，利用太阳内部的实际自转状态是不是仍能解释斯波勒定律呢？很遗憾，不能。事实上，它很不幸地会导致黑子分布规律的逆转，即变成了从低纬度向高纬度扩张，与斯波勒定律恰好相反。这样一来，原先“买一送一”的友情馈赠反倒变成了躲都躲不开的“硬性搭售”。更麻烦的是，早期发电机机制被认为是在对流区中起作用的，新的研究却发现，太阳对流区的环境过于恶劣，到处是强劲的湍流。在那样的环境下，磁通量管很快就会被撕碎，从而根本就不可能有时间来孕育足够强的磁场。这样一来，发电机机制连对流区这一“老巢”都失守了。

这些问题给发电机机制蒙上了巨大的阴影。但天文学家们没有放弃，而是积极寻找着解决之道。到了20世纪90年代中期，一种新设想为发电机机制注入了新活力。这种新设想就是“迁居”——将发电机机制的作用地点由对流区迁移到差旋层中。差旋层我们在第12章末尾曾经提到过，它是对流区底部以下的一个薄层，是太阳刚性自转与非刚性自转的交界层。这样的交界层自然也会造成极向场的扭曲，从而也可以启动发电机机制[11]。但与对流区不同的是，差旋层由于地处对流区底部以下，因而是一个相对稳定的地方，发电机机制可以在那里从容不迫地积累强磁场。不仅如此，计算表明，这种新设想所导致的黑子分布规律与斯波勒定律又重新一致了，从而排除了一个重大硬伤，使局势进一步明朗起来。不过硬伤虽已被排除，软伤的有无却是谁也无法打包票。发电机机制作为一个非线性模型，存在着诸如混沌之类的复杂性，而太阳周期本身也是一种复杂现象，这两者的拟合在细节上几乎无可避免地存在很大的不确定性，使得谁也无法保证目前这明朗局势是否是昙花一现，甚至只是回光返照。我们只能说发电机机制是迄今为止有关太阳磁场及太阳周期的比较有希望的机制。

我们对太阳各部分的介绍到这里就全部结束了，这些介绍归根到底是从空间角度加以介绍。也许让读者不无失望的是，我们居然是在一堆谜团的重重包围之下结束了漫长的旅程。但换个角度想想，这岂非恰恰是这一领域充满生机的明证吗？在第14章，同时也是本书的最后一章中，我们将由空间转往时间，去进行一次时间之旅，探索太阳的过去和未来。

---

[1]日冕的温度是用光谱学手段测定的。我们在第6章中提到过，19世纪下半叶，人们曾在日冕中发现过许多新谱线，甚至一度以为发现了新元素，后来才意识到它们来自于高度电离的金属离子。这一点虽然打碎了发现新元素的美梦，却给了人们一个估算日冕温度的机会，因为电离需要高温，要想产生那些日冕谱线所对应的高度电离的金属离子，必须有100万～300万度的高温，这就是日冕温度的观测由来。

[2]看过彗发相片的读者可能会觉得奇怪，彗发“仿佛是被一股来自太阳的‘风’吹起来的”是一种很容易萌发的感觉，为何直到20世纪50年代才由比尔曼提出太阳风的想法呢？这是因为对这种感觉有一种更简单的解释，那就是彗发是被阳光本身的光压“吹”起来的。比尔曼是在排除了这种可能性之后才提出“太阳风”的想法的，而非单纯猜测。另外还要提到的是，比比尔曼早一个世纪的19世纪中叶就有人提出过类似于太阳风的想法，起因是太阳耀斑与地磁暴之间存在时间关联，仿佛后者是由前者所发射的粒子流引起的。（请读者想一想，这种“太阳风”与比尔曼的有何区别？）

[3]太阳风的存在首先由航天器而非地面观测站所证实不是偶然的，因为太阳风是一种以电子和质子为主的带电粒子流，它们会被地磁场所排斥，从而很难被地面观测站所直接探测。另外要提到的是，太阳

风早已不再被视为是日冕的一部分了，甚至连它是否属于太阳大气层，有些文献也有不同的选择。

[4]日球层的边缘不是一个单一概念，它自内向外包含了三个层面：太阳风的风速由超声速变为亚声速的地方被称为“终端激波”（termination shock）；太阳风的压强减弱到无法再推动星际尘埃（即两者压强相等）的地方被称为“日球层顶”（heliopause）；星际介质的运动首度因遭遇太阳风而减速的地方被称为“弓形激波”（bow shock）。另外要提到的是，有些人将日球层的边缘或其中某一个层面——比如“日球层顶”——视为太阳系的边界，那是不合适的，因为它无法涵盖被认为是太阳系最外围的所谓奥尔特云（Oort cloud）。

[5]令人感慨的是，太阳黑子不仅在相对蒙昧的伽利略时代对某些观念造成了冲击，甚至在三百多年后的中国“文革”期间，还因为太阳所承载的政治象征而成为了禁忌，有些教师甚至因为讲授太阳黑子而被打倒，乃至打死。

[6]黑尔的这一研究利用了荷兰物理学家塞曼（Pieter Zeeman，1865—1943）在1897年所发现的所谓塞曼效应（Zeeman effect），它表明光谱线在磁场作用下会分裂，且裂距与磁场强度成正比，这一效应开启了用光谱学手段测算磁场强度的大门。

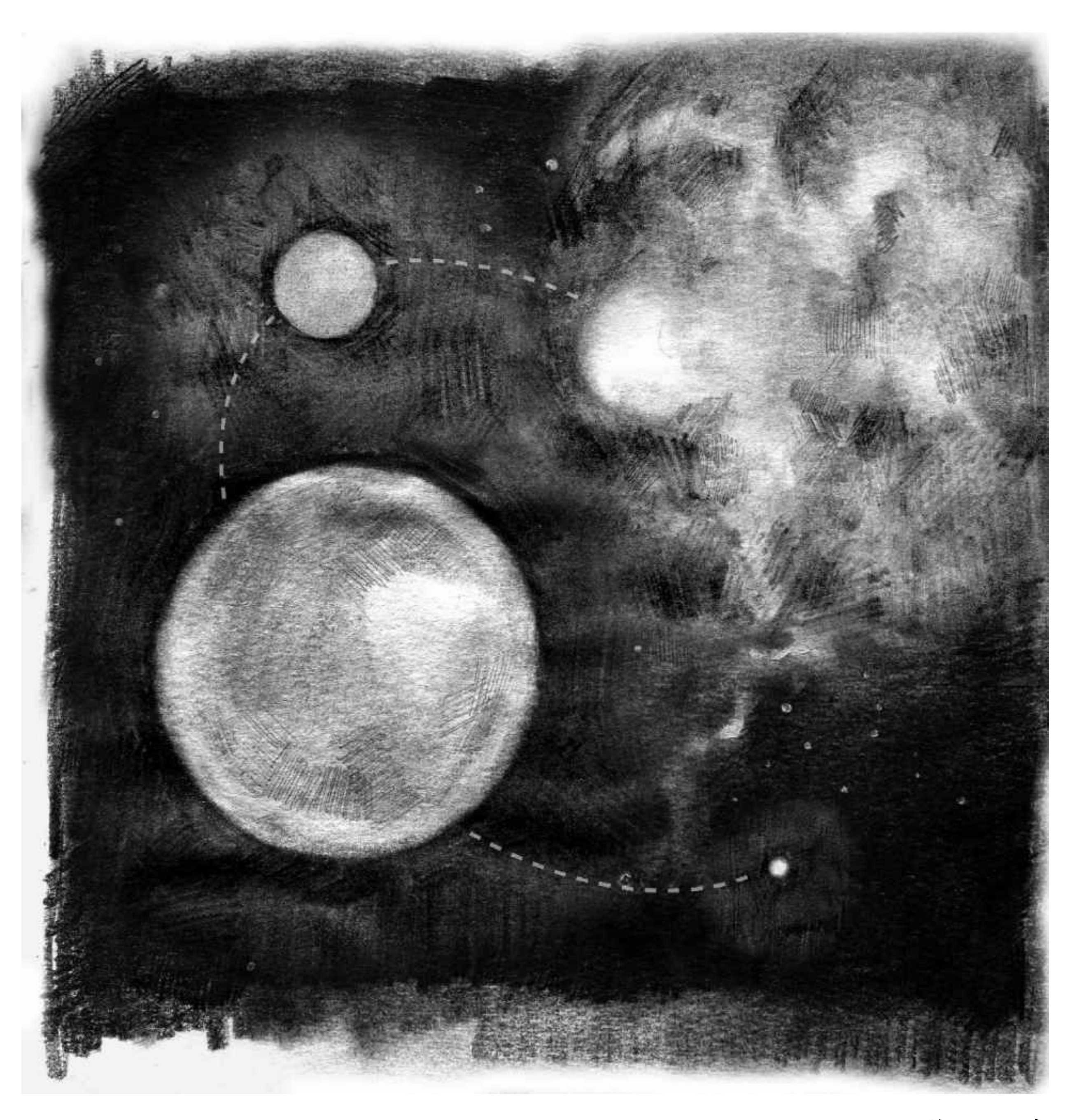
[7]耀斑也能抛射物质，但数量要少得多。另外顺便说一下，无论耀斑还是日冕物质抛射，它们释放的能量虽然都极其可观（瞬间释放的能量能占到整个太阳能量的一个很可观的比例），但由于频谱分布极为宽广，在可见光范围内的相对比例很小，因此不是肉眼所能感知的。

[8]有一个细节在这里要提一下，那就是两个相邻的太阳周期在太阳活动的规模、分布等方面虽然相似，太阳磁场的极性却是相反的。如果把这个差别也考虑进去，那么太阳周期更确切地说是约为22年。这一点是上文提到的美国天文学家黑尔所提出的。

[9]如今回过头来看，在2013年所属的这次太阳周期中，太阳活动并没有如预期那样频繁，也并未对地球造成重大影响，因此美国国家海洋与大气管理局的警报在规模上是错误的。另外，标志这次太阳周期顶峰的黑子数目的最大值出现在2014年，与2013年作为太阳活动极大年的预期也有一定偏差。不过此类预测本就是粗略的，出现这种情形也并不意外。[2015年6月17日补注]

[10]这一点是美国天体物理学家帕克的贡献。他提出，在磁通量管的上浮过程中，因太阳自转而产生的科氏力（Coriolis force，地球上台风中心附近的气流旋转方向主要就是受其影响而形成的）将会使它形成新的扭曲，那些新扭曲在湍流的帮助下将会合并成携带极向场的新磁通量管。

[11]将发电机机制的作用地点移到对流区底部以下的想法，实际上早在差旋层被发现之前的20世纪80年代初就有人提出过，不过细节性的研究直到20世纪90年代中期才出现。



绘画：张京

14　太阳的过去和未来

按我们目前对物理学定律的了解，在四维的物理时空中，我们可以在三个空间维度中自由运动，却只能在时间中“随波逐流”，既不能回到过去，也无法随意前往未来。可人类的好奇心却偏偏对许多事物的过去和未来颇怀有浓厚兴趣，大至宏伟的宇宙，小至普通的生命，人类都想知道它的过去和未来。就连懵懵懂懂的小孩有时也会问：我是从哪里来的？我们太阳之旅的最后一站就要来回应这种好奇心，去探索太阳的过去（起源）是怎样的？它的未来（归宿）又将如何？这些问题不仅是我们的好奇心所系，而且与人类的命运不无关系——假如人类能在地球上存在得足够久的话。

但过去和未来既然是去不了的地方，我们又如何能探索呢？这个看似严重的问题并没有难倒科学家。事实上，我们这整个太阳故事，都是在探索去不了的地方：从太阳的核心到它的大气层，哪儿都不是我们能去的，但通过科学方法，我们依然得到了许多能与观测相印证，从而有很高可信度的结果。探索太阳的过去和未来也是如此。从某种意义上讲，它甚至比前面几章的探索还略微容易些，因为有大量的参照物可供借鉴。那参照物就是其他天体，它们各有各的年龄，有的尚处于“襁褓”阶段，有的是“小伙子”，有的已“人到中年”，有的则已步入“古稀”。通过对它们的观测，我们就能知道太阳的过去和未来大致会是什么样子的，并印证有关太阳演化的理论或假说。这就好比对不同年龄的人进行观察，我们就能知道自己的过去和未来大致会是什么样子的。

当然，我们也不能低估这种探索的难度。毕竟，判断天体的年龄是需要知识的，那种知识的获取则有一定的难度。事实上，单是破除天体

永恒完美的宗教式观念，从而使天体的年龄概念有意义，就经历了一个漫长的过程（参阅第3章）。对天体年龄的具体判断则更复杂，在理论和观测上都是很有难度的。直到今天，科学家们仍在为观测及判定某些特定年龄段的天体而努力着。这种难度导致的一个结果，就是有关太阳演化的早期理论大都带有较大的猜测性，而且主要局限于关注太阳的起源。至于太阳的归宿，在连太阳为什么会发光那样的问题都尚未得到解决的年代，是很难进行有价值的探索的，因此直到20世纪30年代之后，才有值得一提的发展。今天，随着太阳模型的逐步完善以及观测、计算技术的快速发展，我们对太阳演化的研究已变得越来越定量，也越来越有可信度了。当然，这一切距离“结题”无疑还差得很远，这么大的课题几乎注定是要长期探索的。

现代太阳演化理论的奠基者一般被认为是德国哲学家康德（Immanuel Kant，1724—1804）。1755年，这位对自然科学怀有浓厚兴趣的哲学家在《自然通史和天体论》（*General History of Nature and Theory of the Heavens*）一书中提出了太阳系起源的所谓星云假说（nebula hypothesis）。康德这一假说的灵感由来是比较特别的，因为在他那个年代，人们对其他天体的年龄还缺乏认识，从而无法以它们为参照物。康德是从一个完全不同的角度，即太阳系与当时正被陆续发现中的星云之间的相似性，而得到的灵感。[1]不过，康德毕竟是哲学家而不是科学家，他的著作虽然提出了星云假说的雏形，却也充斥着纯粹的臆想，比如他认为绝大多数行星上都存在居民，而且在这纯属臆想的东西之上，还言辞凿凿地提出了离太阳越远的行星上的居民越优秀那样的荒唐结论。[2]对此，英国哲学家罗素（Bertrand Russell，1872—1970）作过一句很幽默的评价：“这种见解作为地球人的谦虚值得赞许，但并无任何科学依据。”

继康德之后对星云假说作出重大贡献的是法国数学家拉普拉斯（Pierre-Simon Laplace，1749—1827）。1796年，他在科普著作《宇宙体系论》（*The System of the World*）的附录中独立地提出了星云假说。拉普拉斯对星云假说的论述作为一部科普读物的附录，明显不如康德的论述来得详细，但却比康德的论述更紧凑、更物理、更注重于为假说寻找观测依据，并且也更注重于一些后来被证实为重要的因素，比如星云的自转。由于拉普拉斯在科学界的声望要明显高于康德，他对星云假说的“插足”在很大程度上促成了这一假说在即将到来的19世纪的流行。为了纪念拉普拉斯的贡献，后人将他的名字与康德并列，将星云假说称为康德-拉普拉斯星云假说，简称星云说。

虽然有拉普拉斯作后盾，星云说的“星运”依然不是一帆风顺的，在经历了19世纪的风光后，星云说开始面临越来越多的细节性困难，甚至一度走向了衰落。与这种衰落遥相呼应的，则是一些其他假说——比如灾变说（认为行星源于外来天体与太阳的碰撞）、爆发说（认为行星源于太阳的爆发）、俘获说（认为行星是太阳的“俘虏”）等——的“揭竿而起”。当然，即便在所谓的衰落期，星云说仍有一定的发展，只是不再像19世纪那样唯我独尊而已。20世纪80年代之后，随着新恒星周围的行星盘被观测天文学家所发现，星云说的命运迎来了新的转机。时至今日，星云说虽依然面临一些困难（太阳系作为一个比太阳更复杂的系统，它的起源理论存在困难是意料中的事），其主流地位却已基本无可撼动。而且星云说的困难大都集中在解释行星和卫星的某些特征上，对于太阳的起源，则几乎已达到了铁板钉钉的确切度。事实上，即便在所谓的衰落期，星云说的对手们也很少挑战它对太阳起源的描述，而将注意力集中在行星和卫星上。

有着两百多年历史的星云说奠定了研究太阳过去（起源）的理论框

架，那么对太阳未来（归宿）的研究又如何呢？这方面的研究历史要短得多。这是因为决定太阳未来的最重要因素：太阳的能量来源，以及那来源可以支撑多久，直到20世纪30年代末才得到初步解决（参阅第8章）。

下面我们就来介绍一下目前学术界有关太阳过去和未来的主流看法。

按照星云说，太阳（以及太阳系的其他主要天体）都是由所谓的星际云（interstellar cloud）坍缩而成的。但星际云有好几种类型，究竟什么样的星际云最有可能成为太阳或其他恒星的“摇篮”呢？要想回答这一问题，我们首先要对星际云的分类作一个简单介绍。星际云的分类是以宇宙中含量最丰富的元素——氢——的形态为依据的。具体地说，星际云通常分为三类，也称为三个区（之所以称为“区”，是因为不同类型的星际云所占据的往往是同一片大星际云的不同区域）：

（1）氢以离子状态存在的被称为HII区，它的温度最高（往往能达到10 000 K）。

（2）氢以原子形态存在的被称为HI区，它的温度适中（通常在100 K左右）。

（3）氢以分子形态存在的被称为分子云（molecular cloud，彩图14），它的温度最低（往往只有10 K左右，几乎是整个星系中最冷的物质），平均密度则较高（每立方厘米约有几百个粒子），相当于太阳附近星际介质密度的100倍以上，因而也被称为稠密云（dense cloud）[3]。

在这三类星际云中，最有可能成为太阳或其他恒星“摇篮”的是分子云。为什么呢？因为一片星际云要想坍缩，必须满足一个显而易见的条

件，那就是不能无限期地“维持现状”（否则坍缩就无从谈起了）。这一条件有一个学术名称，叫做不稳定性（instability）。那么，一片星际云怎样才会有不稳定性呢？答案是它的总质量必须足够大。而且星际云的温度越高、密度越低，出现不稳定性所需要的总质量就越大。这一结果是不难理解的，因为使星际云坍缩的动力是引力，负隅顽抗的则是它作为弥散气体所具有的压强。如果在两者的竞争中引力占到上风，并且在坍缩过程中能持续占到上风，坍缩就会很自然地发生，这样的星际云就有不稳定性。明白了这一点，也就不难理解“温度越高、密度越低，所需要的总质量就越大”了。因为温度高意味着压强大，密度低则意味着引力弱，两者都不利于引力。为了克服这些不利因素，引力必须倚仗它的“独门武功”，那就是总质量。因为总质量越大，引力就越强，这是压强所不具有的特点。因此在“温度越高、密度越低”那样的不利条件下，“所需要的总质量就越大”。

具体的计算表明，星际云产生不稳定性所需的最小质量正比于温度的3/2次方，反比于密度的1/2次方。这一结果是英国物理学家金斯（James Jeans，1877—1946）在1902年给出的。为了纪念这一早期研究，人们把这种不稳定性称为金斯不稳定性（Jeans instability），相应的最小质量则称为金斯质量（Jeans mass）。

那么，分子云的金斯质量有多大呢？计算表明，约为太阳质量的几千倍（相应的线度约为几十至上百光年）。而HI区和HII区的星际云由于温度更高、密度更低，从而金斯质量更大，大到了实际上很少能达到的程度，因此不容易成为太阳或其他恒星的“摇篮”。[4]

有了不稳定性，坍缩就将是不可避免的，因为很多偶然因素——比如附近超新星爆发产生的激波，星际云的相互碰撞，星际云穿越星系旋

臂所遇到的干扰等——都能触发坍缩的发生。那么，坍缩的具体过程会是怎样的呢？质量约为太阳质量几千倍的分子云，会不会坍缩成一个质量达几千个太阳质量的超级恒星呢？答案是否定的。事实上，质量达几千个太阳质量的超级恒星不仅在观测上从未被发现过，在理论上也被认为是不可能的。这其中一个很重要的原因，就是在坍缩过程中，随着密度的增加，金斯质量将会减小（因为金斯质量反比于密度的1/2次方），从而导致分子云中一些较小的部分发生独立的坍缩，使整片分子云分裂成小块。而且那样的小块随着密度的增加还会进一步分裂，使得最终形成的恒星质量远小于星际云的总质量。

但这种分裂也不会无限制地持续下去（否则就只有粉末而不会有恒星了）。当分子云的密度大到一定程度后，坍缩过程中释放出来的引力势能将被裹在其中而无法及时散去，这将造成分子云温度的上升，从而遏制金斯质量的进一步减小（因为金斯质量正比于温度的3/2次方）。计算表明，这时候的金斯质量大约在太阳质量的几分之一至几倍之间，相应的分子云线度则在几千至几万天文单位之间。这种分子云被称为原恒星云（protostellar cloud），太阳系的前身就是那样一片原恒星云。

原恒星云通常是扁盘状的，这是因为星际云通常存在缓慢的自转，在坍缩过程中，这种看似不起眼的自转会使得平行于转轴方向的坍缩比垂直于转轴方向的坍缩更容易进行（因为后者会因角动量的守恒而旋转得越来越快，从而产生越来越显著的离心效应，阻碍坍缩的持续进行），由此导致的结果就是使分子云的形状逐渐变成一个与转轴相垂直的扁盘。这一形状对于解释太阳系行星大致处于同一平面是很重要的。

原恒星云经过一二十万年的进一步坍缩后，其中心区域因引力势能无法及时散去而造成的升温效应变得越来越显著，最终使得热运动产生的压强大到了能抗衡引力的程度。这时的原恒星云中心部分被称为原恒

星（protostar），它处于一种近似的流体静力平衡状态（hydrostatic equilibrium）。不过，这种近似的平衡状态虽能对原恒星本身的坍缩造成显著阻碍，却并不能阻止外侧物质继续向中心凝聚。这种凝聚过程被称为吸积过程（accretion），为这种过程“添砖加瓦”的外侧物质则被称为吸积盘（accretion disk，彩图15）。吸积过程对于恒星的成长是极其重要的，太阳刚刚成为原恒星时，它的质量仅为目前质量的1%左右，其余99%的物质全靠吸积过程来“侵吞”。

吸积过程从物理上讲是非常显而易见的，但由于被浓密的吸积盘所包围，起码在最初阶段是很难被观测到的，是星云说观测验证中为数不多的盲区之一。原恒星的吸积过程大约持续几十万年，当这一过程接近完成时，吸积盘上的物质已大都被原恒星所侵吞，使后者的质量大为壮大，并获得了一个新头衔：主序前星（pre-main sequence star）。

由于阻碍观测的吸积盘上的物质大都被侵吞，使得主序前星成为了一种能被直接观测到的天体。事实上，早在1852年，英国天文学家辛德（John Russell Hind，1823—1895）就在金牛座（Tauri）中发现了主序前星这种特殊阶段的天体，并将其编号为金牛座T星。当然，那时人们还并不知道此类天体在恒星演化过程中的地位，只是将其作为一颗亮度变化着的天体记录在册。如今，金牛座T星已成为了一大类天体的“代言人”，这类天体被统称为金牛座T型星（Tauri T star），它们是像太阳那样的小质量恒星的主序前星。[5]

主序前星由于刚刚由星际云吸积而成，其“身材”在一定程度上还保持了星际云的“飘逸”，而远不如成熟恒星那样结实，它的表面温度比成熟恒星低得多，体积却极为庞大。除此之外，主序前星的另一个显著特点是有强劲的恒星风（对太阳来说就是太阳风）。事实上，原恒星的吸

积过程之所以终止，除了吸积盘上的物质基本用罄外，强劲的恒星风将残余物质吹离也是一个重要原因。有意思的是，主序前星所具有的表面温度低、体积庞大、恒星风强劲等特点都类似于后文将要介绍的红巨星（red giant star），只不过前者是恒星演化的早期阶段，后者则是晚期阶段，[6]但这“一老一少”的遥相呼应，颇像人世间孩童与老人的相似之处。

主序前星的日常活动主要就是“瘦身”——在引力作用下进一步缓慢收缩，这种瘦身活动除了能优化“身材”外，一项最重要的功劳，就是为主序前星提供能量。我们在第8章中曾经提到过迈耶、亥姆霍兹、汤姆孙等人所主张的“引力说”。在那里，它是被当作失败假说来介绍的，但此刻我们却要为它恢复一点名誉，因为对于今天的太阳来说，它虽然是一个失败假说，但在主序前星那一“特定历史时期”它却是完全适用的。因为那时的太阳核心温度还没有高到能引发核聚变反应的程度，引力收缩确实是一种很重要的“替代能源”。

当主序前星的演化进行到后期时，随着核心温度的持续升高，一些“点火温度”较低的轻核将被相继点燃。比如当核心温度达到100万度时，最“易燃”的氘核将被点燃，核心温度达到300万、500万、600万度时锂核（^{3}Li）、铍核（^{4}Be）、硼核（^{5}B）也将被相继点燃。这些轻核的聚变与引力收缩一起，为后期的主序前星提供能量。太阳作为主序前星的“瘦身”过程总共约持续几千万年至一亿年。最终，当核心温度达到800万度时，太阳一生的一个重要时刻来临了：它肚子里储备最丰富的氢元素终于被点燃了。这是太阳的“成人礼”，这时的太阳就正式步入了一生最稳定、并且持续时间很长的阶段——主序星（main sequence star）阶段。今天的太阳已经在这一阶段度过了46亿年的漫长时光，相对于预期寿命来说还只是“中年”而已。

主序星虽然是太阳一生最稳定的阶段，但在如此漫长的时间长河中，它的性质仍会发生缓慢变化。发生这种变化的主要原因，是氢核的含量经长期消耗后逐渐降低，导致核反应数量有所下降，从而使辐射压在与引力的抗衡中屈居下风。辐射压一旦屈居下风，太阳核心就会被引力所压缩。但这种压缩是暂时的，因为太阳核心一经压缩就会升温，而升温将使核聚变反应加速，重新产生出足够强的辐射压来抗衡引力。这种微妙的平衡机制在太阳内部持续起着作用，使太阳保持着总体的稳定。但这种核心温度的逐渐升高会传到外层，使太阳的表面温度也逐渐升高，并因此而逐渐膨胀。当然，这都是极缓慢的过程。研究表明，从主序星伊始到今天，太阳的表面温度大约升高了5%，半径大约膨胀了6%，光度则大约增加了40%。

很明显，这种升温和膨胀的趋势不仅存在于过去，也将持续存在于未来。计算表明，再过10亿年，太阳的光度将在今天的基础上再增加10%左右。这一变化将在地球上导致一系列连锁反应。首先是地表温度上升，接着是海洋蒸发加剧，然后是大气层中水蒸气的含量增加。再接下来则是最糟糕的一步，那就是温室效应。我们今天谈论温室效应时关注得最多的是二氧化碳，但实际上看似很无害的水蒸气才是最重要的温室效应气体（只不过它受人类活动的影响不如二氧化碳那样显著而已）。全球范围内水蒸气含量的增加将导致严重的温室效应。在比较悲观的估计中，整个海洋将因此而蒸发殆尽。当然，一定数量的地下水将得以留存，并在某些地方渗出地表，成为弥足珍贵的新水源。大气层中的水蒸气有时也会以暴雨的形式倾泻而下，形成昙花一现的湖泊。但地表的大部分地区将变成闷热的荒漠，多数生物将会绝种，幸存的物种将大都转入穴居生活。如果那时人类仍存在于地球上的话，或许将借助技术手段加入穴居的行列。

但那样的“好景”也是有期限的，随着太阳光度的继续增加，地球上的环境将继续恶化。在30亿年后的未来，地球的温室效应将彻底失控，那时的地球将会变得类似于今天的金星——那里的温度常年高达460°C，别说生物无法忍受，连熔点较低的金属都将被熔化。那时的地球有生物幸存的可能性将是微乎其微的。而如此凄惨的景象比起即将到来的更可怕的浩劫来说，仍然算不上什么。

在距今约40亿年之后，太阳一生的另一个重要时刻来临了——它核心区的氢燃料在经过了将近90亿年不间断的燃烧后终于到了“油尽灯枯”的一天。太阳从此告别了主序星阶段，步入老年恒星的行列。那时候，太阳的形态将再次发生重大变化，而离太阳最近两颗行星——水星和金星——则将迎来自己的末日。

由于氢燃料的耗尽，太阳核心区的下场只有一个，那就是坍缩。但这种坍缩导致的升温很快就会点燃核心区以外的一个壳层中的氢。因此，这时的太阳内部将发生两件事情：一件是氢燃料耗尽后的核心区在引力作用下发生坍缩；另一件则是核心区以外的一个壳层内的氢发生燃烧，成为新的核反应区。后者产生的高温高压将使整个太阳外层发生远比主序星阶段剧烈得多的膨胀，那时的太阳将变成一颗体积和光度都极为巨大，表面温度却因膨胀过于剧烈而下降到2 600 K左右的天体，那样的天体叫做红巨星[7]。太阳在红巨星阶段将逗留几亿年。那么，变成红巨星后的太阳究竟有多大呢？一般认为，它的体积将达到目前体积的一千万倍，足以膨胀到目前的地球轨道之外。这一阶段的太阳虽然表面温度有所降低，但因表面积的巨大增加，总光度依然极为惊人，约为目前光度的两千倍以上。这是闪耀了近90亿年的太阳在谢幕前的最后演出。在这场演出中，离太阳最近的“群众演员”水星和金星将相继“殉职”，从太阳系行星行列中除名。

但我们脚下这颗地球的命运却比较微妙。

太阳的肚子虽然将膨胀到目前的地球轨道之外，但在这缓慢的膨胀过程中，比目前强劲得多的太阳风将带走大量的太阳物质（整个红巨星阶段被太阳风带走的质量有可能达到太阳总质量的1/3）。太阳物质的损失将减弱太阳对地球的引力束缚，从而使地球公转轨道缓缓远离太阳。不过，这种远离是否足以使地球躲过烈火焚身的浩劫，学术界尚无定论。大家比较有共识的是：地球似乎恰好踩在自己的生死线上，靠近一点就是死，离远一点则是生。至于究竟是死还是生，不同的理论模型给出的结论不尽相同。

另外一点比较有共识的是，即便地球能侥幸躲过烈火焚身的浩劫，地球上的景象也将是不折不扣的地狱景象（彩图16）：殷红似血的太阳几乎占据整个天幕，两千多度的高温从近在咫尺的天空中疯狂地倾泻着热量，地表的很多物质将被熔化，岩浆般的洪流四处流淌，使这个曾经如此多姿多彩的生命乐园变得面目全非。但即便那样的浩劫也很可能只是将最终的毁灭稍稍延后一些而已，因为地球与比邻而居的太阳外层之间的潮汐作用将逐渐消耗地球轨道运动的能量，使地球的轨道逐渐向内缩减，重新投向死神的怀抱。

此时，太阳系外围天体的环境也将发生剧烈的变化，某些外行星卫星上的亘古寒冰将会融化，成为太阳系中新的海洋——当然，它们的成分与今天的地球海洋是截然不同的。

那么坍缩中的太阳核心又将如何呢？它会一直坍缩下去吗？答案是否定的。由于氢的耗尽，太阳核心的主要成分将变成氦，随着氢壳层的不断燃烧，越来越多新生成的氦将加入到坍缩中的氦核心上。而它的温度则随着坍缩的进行而不断升高。最终，当氦核心的质量达到太阳总质

量的45%以上时，它的坍缩将使温度升高到一亿度以上。这时候，很“耐热”的氦核终于也被点燃了，开始发生氦核聚变成碳核^{12}C，以及氦核与碳核聚变成氧核^{16}O的核聚变反应。这个点火过程几乎瞬息之间就能传遍整个氦核心，称为“氦闪”（Helium flash）。此后的太阳核心将进入最后一个燃烧阶段——氦燃烧阶段。

氦燃烧的一个很突出的特点，是它对温度的依赖性比氢燃烧还要敏感得多，哪怕核心温度只有2%的变化，也会导致光度的加倍或减半。由于这种敏感依赖性，太阳的光度和体积将会发生频繁的脉动，尚未被太阳风带走的太阳外层物质将会在这种脉动中惨遭抛弃。与氢燃烧相似，氦燃烧也将经历一个核心区的氦先耗尽，然后延烧至核心区以外的一个壳层上的过程，只不过整个历时比氢燃烧短得多，总共只有几千万年。

在太阳这整个晚年阶段中被太阳风及脉动抛射出去的太阳外层的物质，将在行将就木的太阳周围形成一片美丽的小星云，称为行星状星云（planetary nebula，彩图17）。这种星云早在18世纪时就已被发现，因其在小型望远镜中形象与行星相类似而得名。但它们的真正身份则是在晚得多的时候才被“揭发”出来的。“揭发”的证据主要有两条：一是它们普遍在向外膨胀，说明它们是某种抛射过程的产物；二是在它们的中心发现了致密的核心，那样的核心与耗尽了核燃料后的恒星残骸完全相符。行星状星云中除了包含恒星外层那些未经燃烧的轻元素外，还包含一些被对流带到外层的碳、氧等恒星核聚变反应所生成的重元素。在遥远将来的某一天，它们也许将与宇宙中的其他物质汇集成新的大型星际云，并成为新一代恒星、行星，乃至生命的原材料。

对于太阳来说，那时的它已用尽了所有可资利用的核燃料，抛掉了

所有可以抛掉的外层物质，成为了一个富含氦燃烧产物——碳和氧——的光秃秃的内核。当然，其中还有大量的电子，因为太阳核心是电中性的，不可能只有原子核。这个内核的质量略多于目前太阳质量的一半，它初始时的温度极高，但却没高到足以点燃碳核与氧核的程度，燃烧了近百亿年的太阳核心洪炉就此永久性地熄了火。那么，此时的太阳用什么来抗衡引力呢？答案是：依靠一种新的压强电子简并压强（electron degeneracy pressure）。这种压强源于物理学上的一条著名原理，叫做“泡利不相容原理”，它表明像电子那样的粒子是一群极有“个性”的家伙，每个都想拥有一个独一无二的状态，这种“个性”导致的后果之一就是它们倾向于占据较大的空间。这就好比一群人如果个个都想拥有单独的房子，而不愿与人合租，他们所占据的空间就会较大。这种占据较大空间的倾向在宏观上的表现就是压强，这就是所谓的电子简并压强。

在太阳的核心永久熄火后，正是这种电子简并压强抗衡住了引力，使太阳处于一个稳定状态。这一状态极为致密，虽然拥有太阳的全部残留物质（约为地球质量的20万倍），体积却与地球相当。如果我们能从那时的太阳上舀下一汤匙物质的话，它将重达几吨！处于这一阶段的晚年恒星将在很长时间内维持很高的温度，发出炽热的白光，因此被称为白矮星（white dwarf star）。这种白矮星自20世纪初以来已被大量地发现，成为印证太阳演化理论最后一个环节的可靠证据。[8]白矮星虽然炽热，但由于不再产生新的能量，最终将在冰冷的星际空间中逐渐冷却，由白变黑，成为一颗不再发光的冰冷天体——黑矮星，它的巨大引力场将是曾经生机勃勃的太阳系的最后墓碑。如果那时有什么智慧生物路过太阳的话，将只能从那巨大的引力场中发现它的存在，而它曾经抚育过的无数生灵，则早已成为过往烟云。

这就是太阳的归宿，也是我们太阳故事的尾声。[9]当我们在本书的

开头遥望那光芒夺目的太阳时，哪怕有最高明的想象力，我们能想象出科学为我们勾勒出的如此宏大的图景吗？这种图景与最高明的想象相比也毫不逊色，但与单纯的想象截然不同的是，它的每一个结论都有直接或间接的证据，它的每一步推理都有严密可靠的逻辑，它用观测去印证，用逻辑来衔接，它所展现的是科学最动人心魄的力量和美感。

---

[1]很难能可贵的是，在那个很多人视银河系为整个宇宙的年代，康德将星云视为了与银河系具有相似地位的所谓“岛宇宙”（island universe），与20世纪之后才确立起来的河外星系的概念不谋而合。

[2]康德的《自然通史和天体论》有不止一种中译本，较新的译本收录于《康德著作全集》第一卷（李秋零主编，中国人民大学出版社2003年版）。不过有必要提醒有兴趣参阅该译本的读者注意的是：该书第334页将康德的这一臆想错译成了含义截然相反的“他们的居处离太阳越近，他们就越优秀、越完善”。

[3]与之相对应地，HI区和HII区星际云通常被合称为漫射云（diffuse cloud）。不过“漫射云”这个译名（参阅中国天文学会天文学名词审定委员会的“天文学名词”网站）我个人认为不是很妥帖，因为“漫射”一词给人一种较明显的动态感觉，与此处的实际含义有一定出入，不如译成“弥散云”更为合适。另外要指出的是，此处所谓的“稠密”和“弥散”是相对的，与我们日常所接触的气体相比，哪怕稠密云也是“弥散”得一塌糊涂的东西，密度不到海平面空气的10^{16}分之一，甚至比一般实验室里的高真空还要“弥散”得多。

[4]比如HI区星际云的金斯质量往往高达100 000个太阳质量以上，数量要比分子云稀少得多。不过稀少归稀少，那样的星际云毕竟还是有

的，因此确实有一部分恒星的形成被认为是始于HI区星际云的坍缩。

[5]除金牛座T型星外，主序前星还有另外两个主要类别：猎户座FU型星（FU Orionis star）和赫比格Ae/Be型星（Herbig Ae/Be star），其中前者一般被认为是金牛座T型星的早期演化阶段，而后者则是大质量恒星的主序前星。

[6]这一点也正是对主序前星与红巨星进行观测区分的关键所在，因为恒星演化的早期阶段与经历了核聚变反应后的晚期阶段在元素丰度上存在很大差异，这种差异可以用光谱学手段予以分辨。

[7]红巨星作为恒星晚年演化阶段的想法是20世纪30年代之后确立起来的。但有意思的是，英国小说家威尔斯（H. G. Wells，1866—1946）在1895年发表的著名科幻小说《时间机器》（The Time Machine）中有一段关于太阳未来的描述非常类似于红巨星："我被地球的命运之谜所吸引，停停走走，一步千年地迈进着，怀着奇异的兴趣注视着西边天幕上的太阳变得越来越大，越来越暗淡……最终，在三千多万年之后，太阳的巨大红色圆面遮蔽了将近十分之一的暗淡天空。"不过，撇开字面上的相似性不论，威尔斯对红巨星的真正威力显然没什么认识，在他的小说中，那时的地球上仍存在着地衣、苔藓及很多穴居的生物。

[8]白矮星只是像太阳这样的小质量恒星的归宿，而非恒星的唯一归宿。质量远大于太阳的恒星将会坍缩成更致密的中子星，甚至成为黑洞。相应的，它们的核聚变反应也不会终止于氦燃烧，而将经历若干重核的燃烧，并且它们在"临死之前"还将发生威力惊人的大爆炸——超新星爆发（supernova）。

[9]当然，这还不是太阳最终、最遥远的命运，后者是与整个宇宙的命运息息相关的，所涉及的因素包括宇宙学常数的大小、宇宙的开放与封闭等。那些话题由于远远超出了本书的范围，就不在此处介绍了。

附录　太阳档案

平均直径(mean diameter)	139.2万千米
椭率(ellipticity)	0.000 05
质量(mass)	1.989 1×10^{27}吨
平均密度(mean density)	1 408千克/立方米
表面重力加速度(surface gravity)	274.0米/秒^2
表面逃逸速度(escape velocity)	617.6千米/秒
目视星等(visual magnitude)	−26.74
绝对星等(absolute magnitude)	4.83
光谱类型(spectral type)	G2 V
光度(luminosity)	3.846×10^{26}瓦特
表面有效温度(effective temperature)	5 778度(绝对温标)
中心温度(central temperature)	1 571万度(绝对温标)
中心密度(central density)	162 200千克/立方米
中心压强(central pressure)	2 477亿帕斯卡
地球平均距离(mean distance from Earth)	1.496亿千米
银心平均距离(mean distance from milky way core)	26 000光年
绕银心公转周期(galactic period)	2.25亿～2.50亿年
自转周期(rotation period)	16°：25.38日 赤道：25.05日 两极：34.3日
自转倾角(obliquity)	与黄道面：7.25° 与银道面：67.23°

人名索引

A

奥普泽（Theodor von Oppolzer）

奥希亚德（Andreas Osiander）

B

巴克尔（John Bahcall）

柏拉图（Plato）

贝克勒尔（Henri Becquerel）

贝纳（Henri Bénard）

贝塞尔（Friedrich Bessel）

贝特（Hans Bethe）

本生（Robert Bunsen）

比尔曼（Ludwig Biermann）

玻尔（Niels Bohr）

玻尔兹曼（Ludwig Boltzmann）

玻意耳（Robert Boyle）

布鲁诺（Giordano Bruno）

C

查德维克（James Chadwick）

查普曼（Sydney Chapman）

D

戴森（Frank Dyson）

戴维斯（Raymond Davis Jr.）

德伯纳（Franz-Ludwig Deubner）

德拉鲁（Warren De la Rue）

德雷尔（Sidney Drell）

德西特（Willem de Sitter）

狄拉克（Paul Dirac）

笛卡儿（René Descartes）

第谷（Tycho Brahe）

杜瓦尔（Tom Duvall）

F

费恩曼（Richard Feynman）

费米（Enrico Fermi）

夫浪禾费（Joseph von Fraunhofer）

弗雷泽（Edward Frazier）

弗洛因德利希（Erwin Freundlich）

福塞特（Eric Fossat）

G

伽利略（Galileo Galilei）

伽莫夫（George Gamow）

哥白尼（Nicolaus Copernicus）

格雷克（Gerard Grec）

格里波夫（Vladimir Gribov）

格罗斯曼（Marcel Grossmann）

H

哈维（Geoffrey Harvey）

哈维（Jaqck Harvey）

海森伯（Werner Heisenberg）

亥姆霍兹（Hermann von Helmholtz）

赫茨普龙（Ejnar Hertzsprung）

赫歇耳（John Herschel）

赫歇耳（William Herschel）

黑尔（George Hale）

黑尔斯（Thomas Hales）

亨德森（Thomas Henderson）

胡克（Robert Hooke）

怀特黑德（Alfred Whitehead）

霍尔顿（Gerald Holton）

J

基尔霍夫（Gustav Kirchhoff）

教宗保罗三世（Pope Paul Ⅲ）

教宗厄本八世（Pope Urban Ⅷ）

教宗约翰·保罗二世（Pope John Paul Ⅱ）

金斯（James Jeans）

K

卡文迪许（Henry Cavendish）

开普勒（Johannes Kepler）

坎贝尔（William Campbell）

康德（Immanuel Kant）

考恩（Clyde Cowan）

克莱因（Felix Klein）

克里奇菲尔德（Charles Critchfield）

孔德（Auguste Comte）

库兹明（Vadim Kuzmin）

L

拉普拉斯（Pierre-Simon Laplace）

莱顿（Robert Leighton）

莱因斯（Frederick Reines）

朗道（Lev Landau）

朗诺（Lon Nol）

里根（Ronald Reagan）

卢瑟福（Ernest Rutherford）

罗素（Bertrand Russell）

罗素（Henry Russell）

罗兹（Edward Rhodes）

洛克耶（Norman Lockyer）

洛伦兹（Hendrik Lorentz）

M

马克西米利安一世（Maximilian I）

迈耶（Julius von Mayer）

米克耶夫（Stanislav Mikheyev）

莫塞莱（Henry Moseley）

默里（Andrew Murray）

N

能斯特（Walther Nernst）

牛顿（Isaac Newton）

O

欧多克斯（Eudoxus）

P

庞蒂科夫（Bruno Pontecorvo）

泡利（Wolfgang Pauli）

佩恩（Cecilia Payne）

佩林（Jean Perrin）

普朗克（Max Planck）

普朗特（Ludwig Prandtl）

普耶特（Claude Pouillet）

Q

钱德拉塞卡（Subrahmanyan Chandrasekhar）

S

塞曼（Pieter Zeeman）

塞奇（Angelo Secchi）

施瓦布（Heinrich Schwabe）

史瓦西（Karl Schwarzschild）

斯顿夫（Carl Stumpf）

斯米诺夫（Alexei Smirnov）

斯塔克（Johannes Stark）

斯特藩（Joseph Stefan）

索德纳（Georg von Soldner）

索迪（Frederick Soddy）

T

泰勒（Edward Teller）

汤川秀树（Hideki Yukawa）

汤姆孙（J. J. Thomson）

汤姆孙（William Thomson）

托勒密（Ptolemy）

W

瓦耳勒（Jules Violle）

外尔（Hermann Weyl）

威尔斯（H. G. Wells）

维恩（Wilhelm Wien）

魏茨泽克（Carl von Weizsäcker）

沃芬斯坦（Lincoln Wolfenstein）

沃拉斯顿（William Wollaston）

沃特斯顿（John Waterston）

乌尔里克（Roger Ulrich）

X

西尔维斯坦（Ludwik Silberstein）

希尔伯特（David Hilbert）

希罗多德（Herodotus）

希帕克（Hipparchus）

小柴昌俊（Masatoshi Koshiba）

辛德（John Russell Hind）

Y

亚里士多德（Aristotle）

英费尔德（Leopold Infeld）

Z

詹森（Pierre Janssen）

术语索引

《天体运行论》

《物理学的进化》

《宇宙体系论》

《自然通史和天体论》

《自然哲学的数学原理》

A

阿尔文波

奥尔特云

B

白矮星

半影

北极星

贝利珠

贝纳胞

本轮

本生灯

本影

本征态

标准模型

标准太阳模型

表观视运动

表观太阳日

C

差旋层

超级神岡探测器

超新星

传导

磁通量管

D

大麦哲伦星云

等离子体

等效原理

地磁暴

地心说

电荷守恒定律

电子

电子简并压强

定天镜

对流

对流区

对流坍塌

多普勒效应

惰性中微子

F

发电机机制

分子云

丰度

夫琅禾费线

G

H

黑矮星

黑体辐射

黑子

恒星日

恒星月

红巨星

混合程理论

混合矩阵

J

基尔霍夫电路定律

基尔霍夫热辐射定律

极光

降交点

交点的退行

交点年

交点线

截止频率

介子

金牛座T星

金斯不稳定性

金斯质量

进动

近点月

经院哲学家

均轮

K

开普勒猜想

科氏力

可栖息带

L

拉格朗日点

莱顿天文台

里克天文台

量子理论

猎户座FU型星

M

蒙德极小期

米粒

冕洞

N

能量守恒定律

宁静太阳

牛顿冷却定律

P

泡利不相容原理

偏心等距点

平均太阳日

Q

R

S

塞曼效应

三角视差法

三棱镜

色球层

色散

沙罗序列

沙罗周期

嬗变

神岡探测器

升交点

食季

食年

史瓦西解

史瓦西判据

束后本影

朔望月

斯波勒定律

斯塔克效应

斯特藩-玻尔兹曼常数

斯特藩-玻尔兹曼定律

T

太阳风

快太阳风

慢太阳风

太阳风暴

太阳和日球层探测器

太阳活动

太阳活动极大年

太阳活动极小年

太阳日

太阳中微子单位

太阳中微子问题

太阳周期

碳氮氧循环

天体照相仪

湍流

W

万有引力常数

维恩位移定律

温度最低层

温室效应

五分钟振荡

X

吸积过程

吸积盘

狭义相对论

谐振腔

星际云

星云假说

星云说

行星凌日

行星状星云

Y

阳历

耀斑

纤耀斑

阴历

原恒星

原恒星云

月相

Z

针状物

质能关系式

质子

质子-质子链

中微子

太阳中微子

电子中微子

μ子中微子

τ子中微子

中微子振荡

中性流反应

中子

终端激波

周年视运动

周日视运动

主序前星

主序星

参考文献

［1］Armitage A. Copernicus and Modern Astronomy［M］. New York：Dover Publications Inc，2004.

［2］Bartusiak M. Archives of the Universe：100 Discoveries That Transformed Our Understanding of the Cosmos［M］. New York：Vintage Books，2004.

［3］Bhatnagar A，Livingston W. Fundamentals of Solar Astronomy［M］. Berlin：Springer-Verlag，2010.

［4］Bilenky S. Introduction to the Physics of Massive and Mixed Neutrinos ［M］. Singapore：World Scientific Publishing Co Pte Ltd，2005.

［5］Celnikier L M. Find a Hotter Place！A History of Nuclear Astrophysics ［M］. Singapore：World Scientific Publishing Co Pte Ltd，2006.

［6］Chandrasekhar S. 爱丁顿——当代天体物理学家［M］. 吴智仁，等，译. 上海：远东出版社，1992.

［7］Chaplin W J. Music of the Sun：The Story of Helioseismology［M］. London：Oneworld Publications，2006.

［8］Clerke A M. A Popular History of Astronomy during the

Nineteenth Century［M］. London：Adam & Charles Black，1893.

［9］Crelinsten J. Einstein's Jury：The Race to Test Relativity［M］. Princeton：Princeton University Press，2006.

［10］Dwivedi B N. Dynamic Sun［M］. Cambridge：Cambridge University Press，2003.

［11］Enghag P. Encyclopedia of the Elements ［M］. Hoboken：Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA，2004.

［12］Foukal P V. Solar Astrophysics［M］. Hoboken：Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA，2004.

［13］Franklin A. Are There Really Neutrinos［M］. New York：Perseus Books，2001.

［14］Fukugita M. Yanagida T. Physics of Neutrinos and Applications to Astrophysics ［M］. Berlin：Springer-Verlag Berlin Heidelberg，2003.

［15］Galileo G（author）. Finocchiaro M（ed）. The Essential Galileo ［M］. Indinapolis：Hackett Publishing Company，Inc，2004.

［16］Giunti C. Kim C W. Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics ［M］. Oxford：Oxford University Press，2007.

［17］Golub L. Pasachoff J M. Nearest Star：The Surprising Science of Our Sun［M］. Cambridge：Harvard University Press，2002.

［18］Harrington P S. Eclipse：The What，Where，When，Why，

and How Guide to Watching Solar and Lunar Eclipses［M］. New York：John Wiley & Sons，Inc，2008.

［19］Holton G. 物理科学的概念和理论导论［M］. 张大卫，等，译. 北京：高等教育出版社，1983.

［20］Hoskin M. The Cambridge Illustrated History of Astronomy［M］. Cambridge：Cambridge University Press，1997.

［21］Isaacson W. Einstein：His Life and Universe［M］. New York：Simon & Schuster，2008.

［22］Jackson M W. Spectrum of Belief：Joseph von Fraunhofer and the Craft of Precision Optics［M］. Cambridge：The MIT Press，2000.

［23］Kennefick D. Not Only Because of Theory：Dyson，Eddington and the Competing Myths of the 1919 Eclipse Expedition［J/OL］. http://arXiv.org/abs/0709.0685v2.

［24］Kline M. 古今数学思想（第一册）［M］. 张理京，张锦炎，江泽涵，译. 上海：上海科学技术出版社，2002.

［25］Lang K R. The Cambridge Encyclopedia of the Sun ［M］. Cambridge：Cambridge University Press，2009.

［26］Lang K R. The Sun from Space［M］. Berlin：Springer-Verlag Berlin Heidelberg，2009.

［27］Littmann M. Espenak F，Willcox K. Totality：Eclipses of the Sun［M］. Oxford：Oxford University Press，2001.

［28］Lowe A. Neutrino Physics & The Solar Neutrino Problem［J/OL］. http://arXiv.org/abs/0907.3658vl.

［29］Mobberley M. Total Solar Eclipses［M］. Berlin：Springer Science + Business Media，LLC，2007.

［30］Motz L. The Story of Astronomy［M］. New York：Perseus Publishing，1995.

［31］Pais A. Subtle is the Lord：The Science and the Life of Albert Einstein［M］. Oxford：Oxford University Press，2005.

［32］Rieutord M. The Sun's Supergranulation［J］. Living Rev Solar Phys，2010，7.

［33］Russell B. Religion and Science［M］. Oxford：Oxford University Press，1997.

［34］Steel D. Eclipse［M］. The Joseph Henry Press，2001.

［35］Stix M. The Sun：an Introduction［M］. Berlin：Springer-Verlag Berlin Heidelberg，2004.

［36］Tassoul J. Tassoul M. A Concise History of Solar and Stellar Physics［M］. Berlin：Princeton University Press，2004.

［37］Taylor S R. Solar System Evolution：A New Perspective［M］. Cambridge：Cambridge University Press，2001.

［38］Thomas I（trans）. Selections Illustrating the History of Greek

Mathematics Ⅱ［M］. London：William Heinemann Ltd，1941.

［39］Ward P，Brownlee D. Rare Earth：Why Complex Life Is Uncommon in the Universe［M］. Berlin：Springer，2003.

［40］Whitehouse D. The Sun：A Biography［M］. New York：John Wiley & Sons，Ltd，2004.

［41］Zirker J B. Journey from the Center of the Sun［M］. Princeton：Princeton University Press，2004.

［42］Zirker J B. The Magnetic Universe［M］. Baltimore：The Johns Hopkins University Press，2009.

［43］黄润乾. 恒星物理［M］. 北京：科学出版社，2000.

［44］林元章. 太阳物理导论［M］. 北京：中国科学技术出版社，2006.

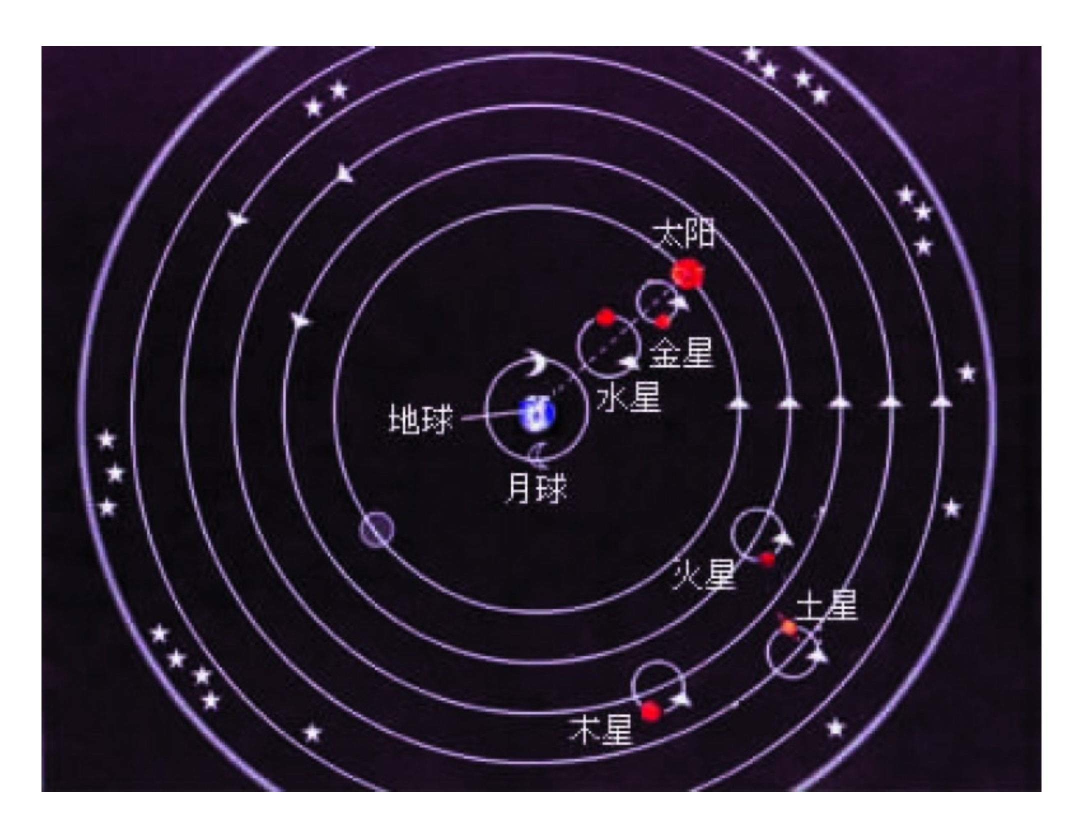
［45］张昌明，肖耐园. 天文学教程（上册）［M］. 北京：高等教育出版社，1987.



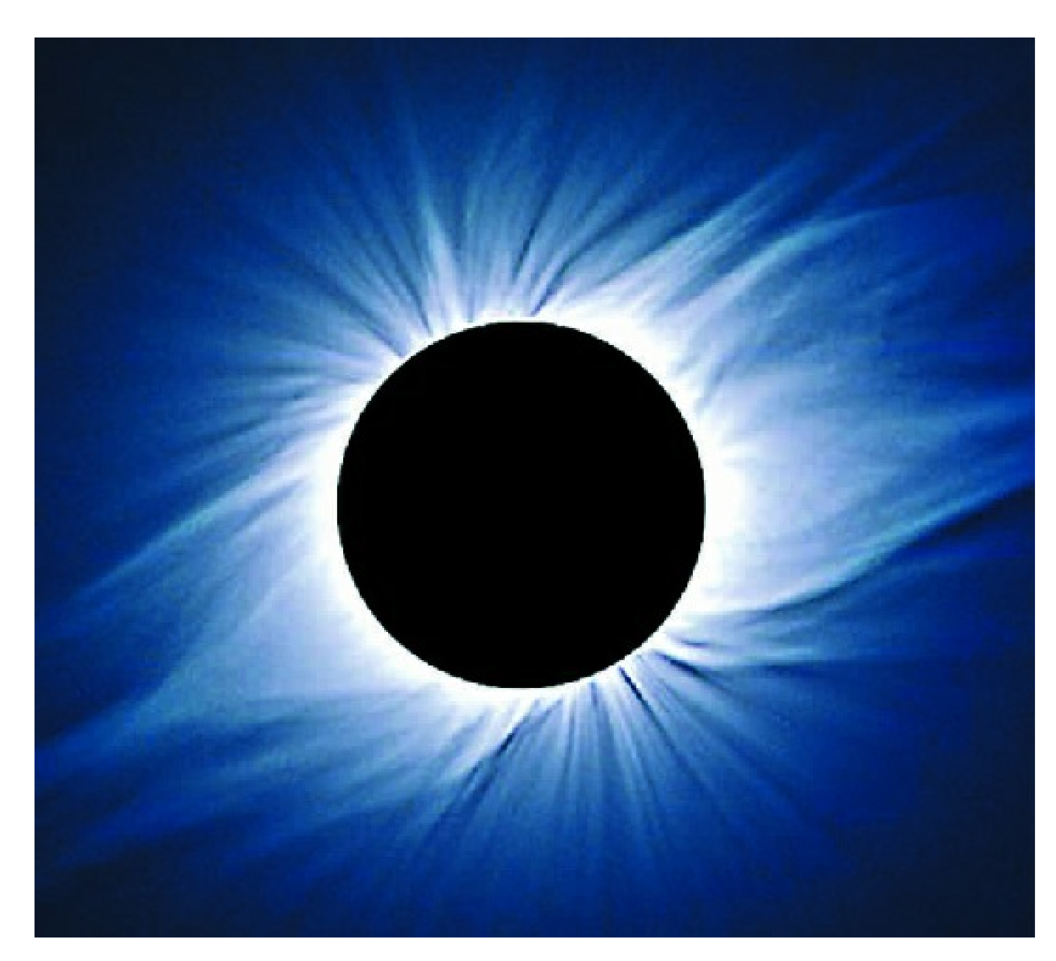
彩图1　夕阳下的古希腊神庙遗址



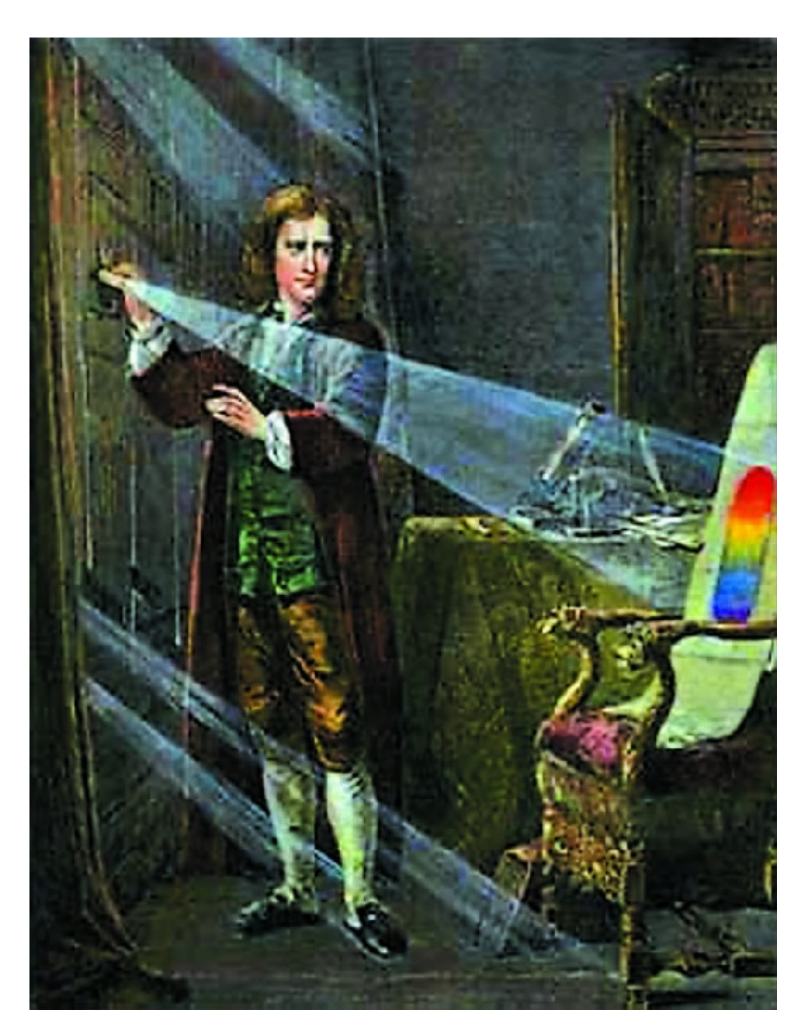
彩图2　月相的变化



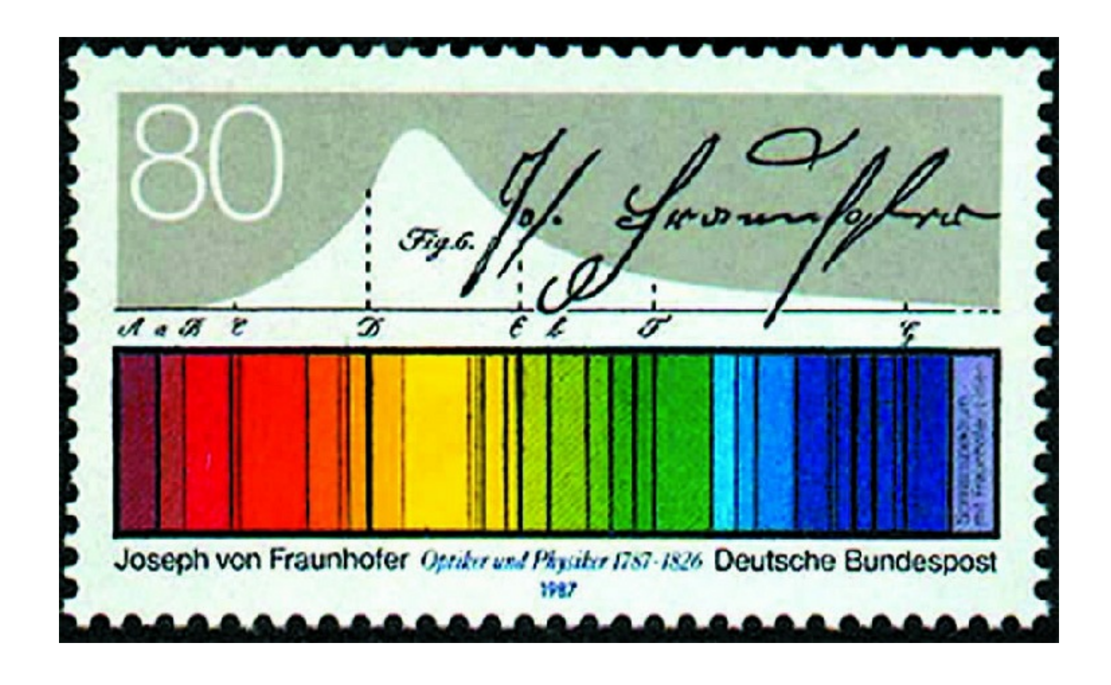
彩图3　简化版的地心说模型



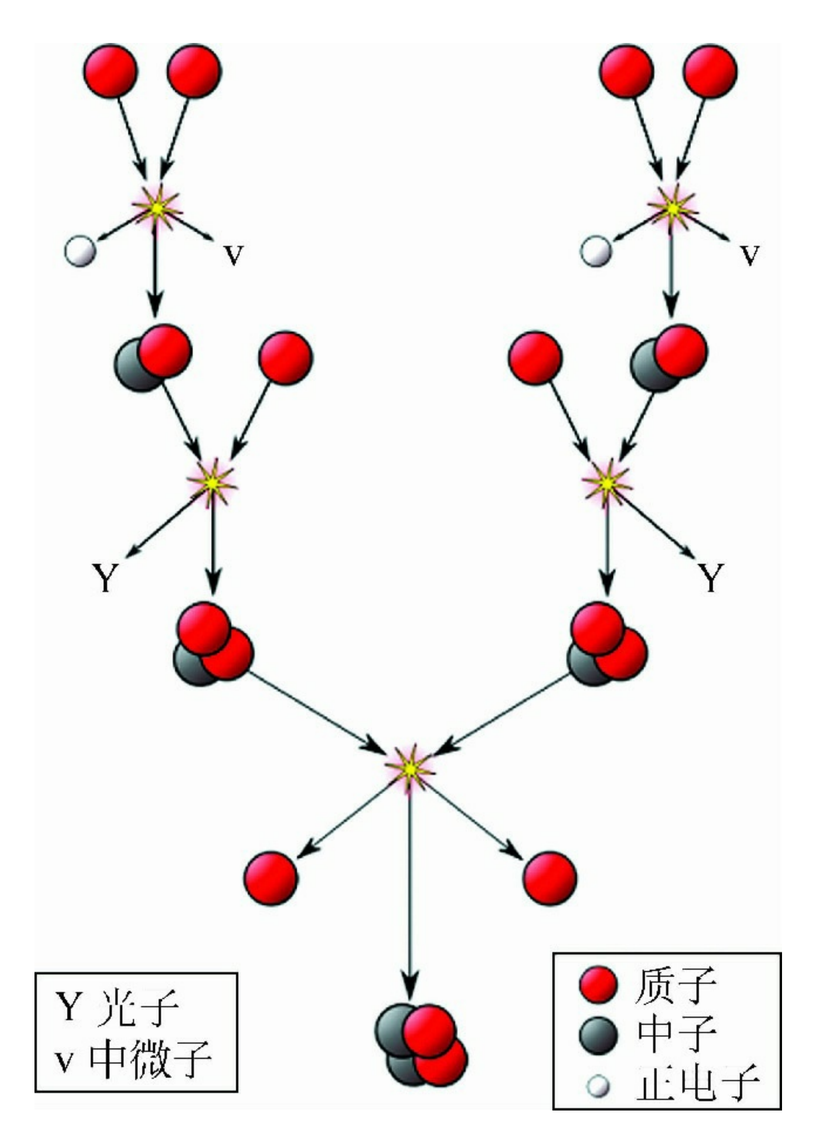
彩图4　日全食



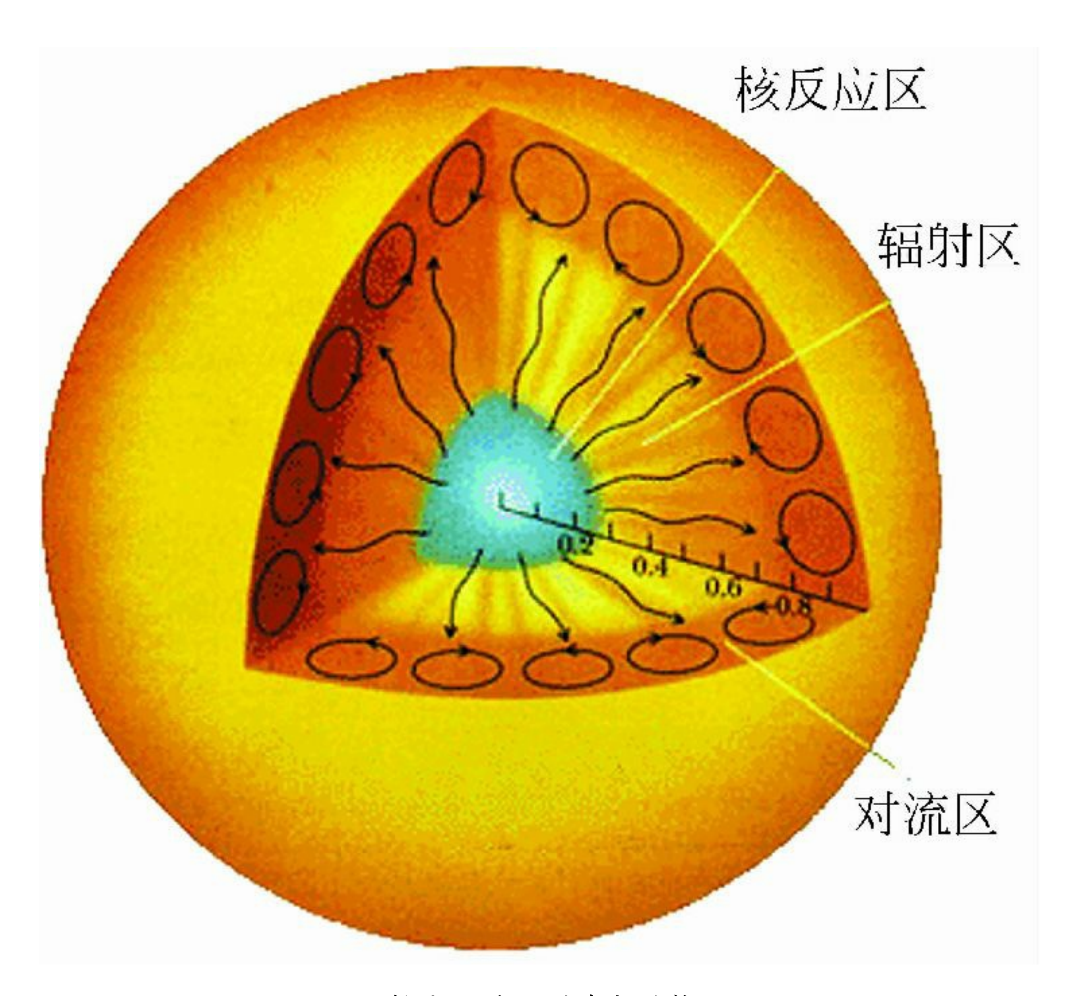
彩图5　光的色散


80
Fig.6.
Joseph von Fraunhofer
Optiker und Physiker 1787-1826
Deutsche Bundespost
1987

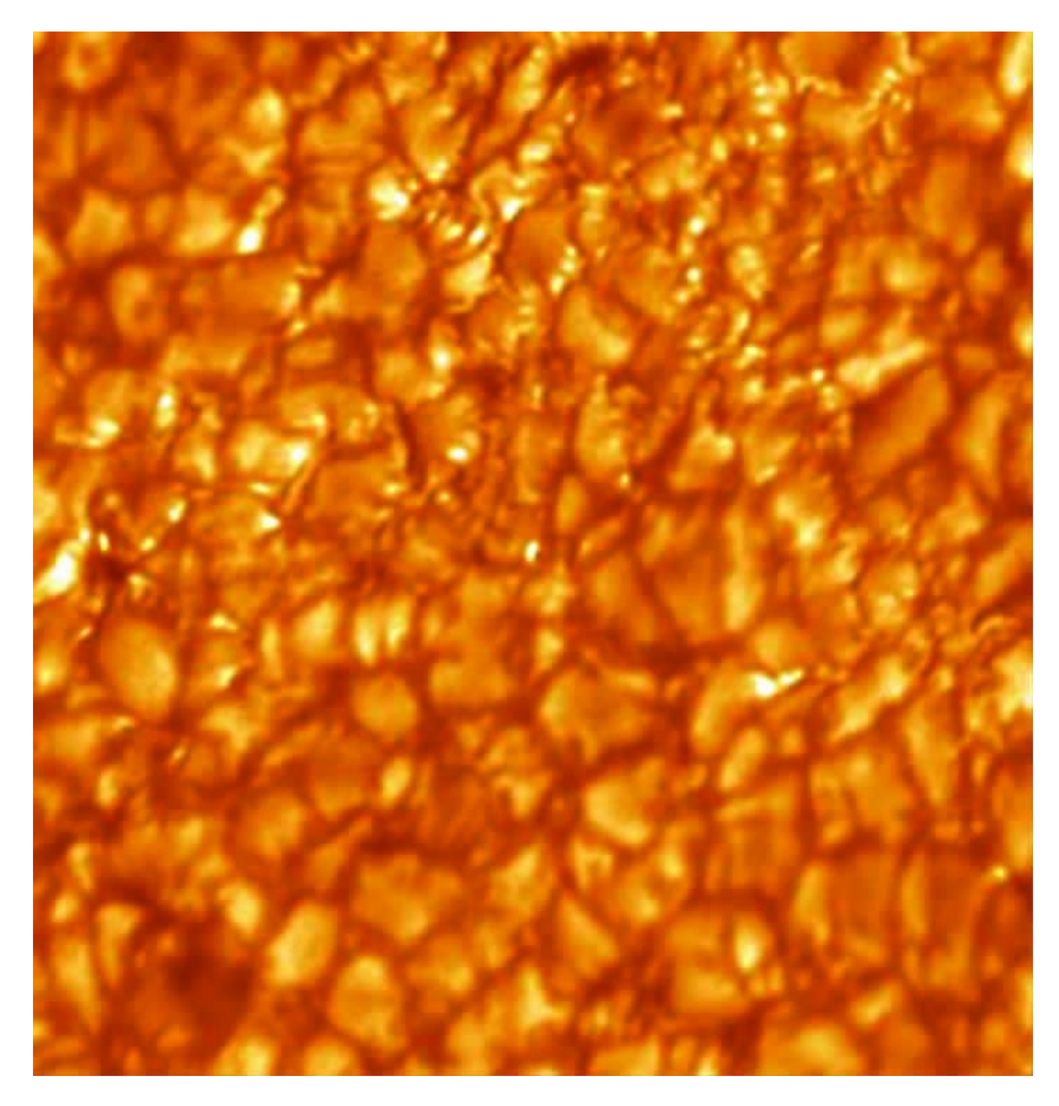
彩图6　纪念夫琅禾费诞辰两百周年的邮票



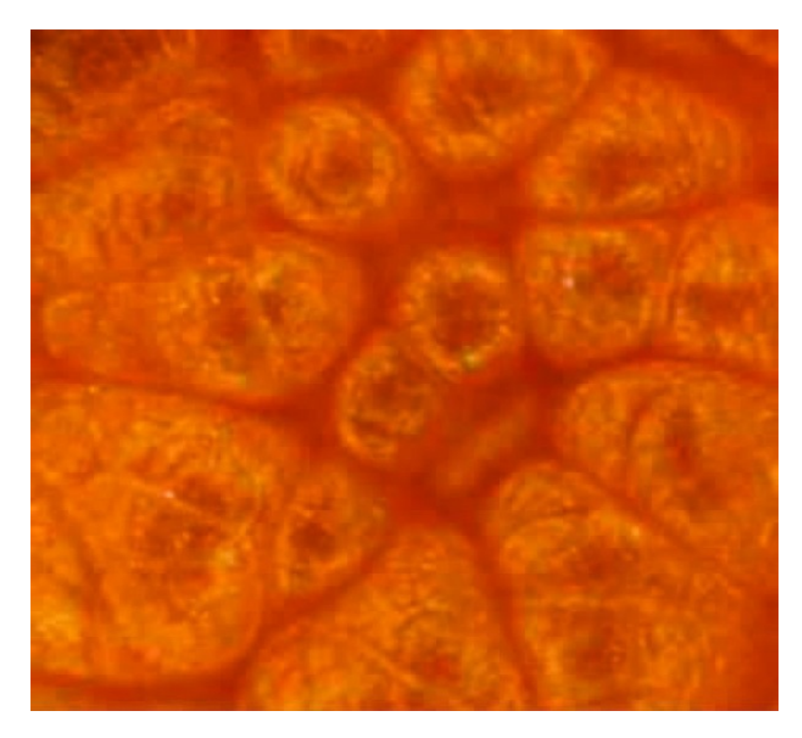
彩图7　第一类质子-质子链



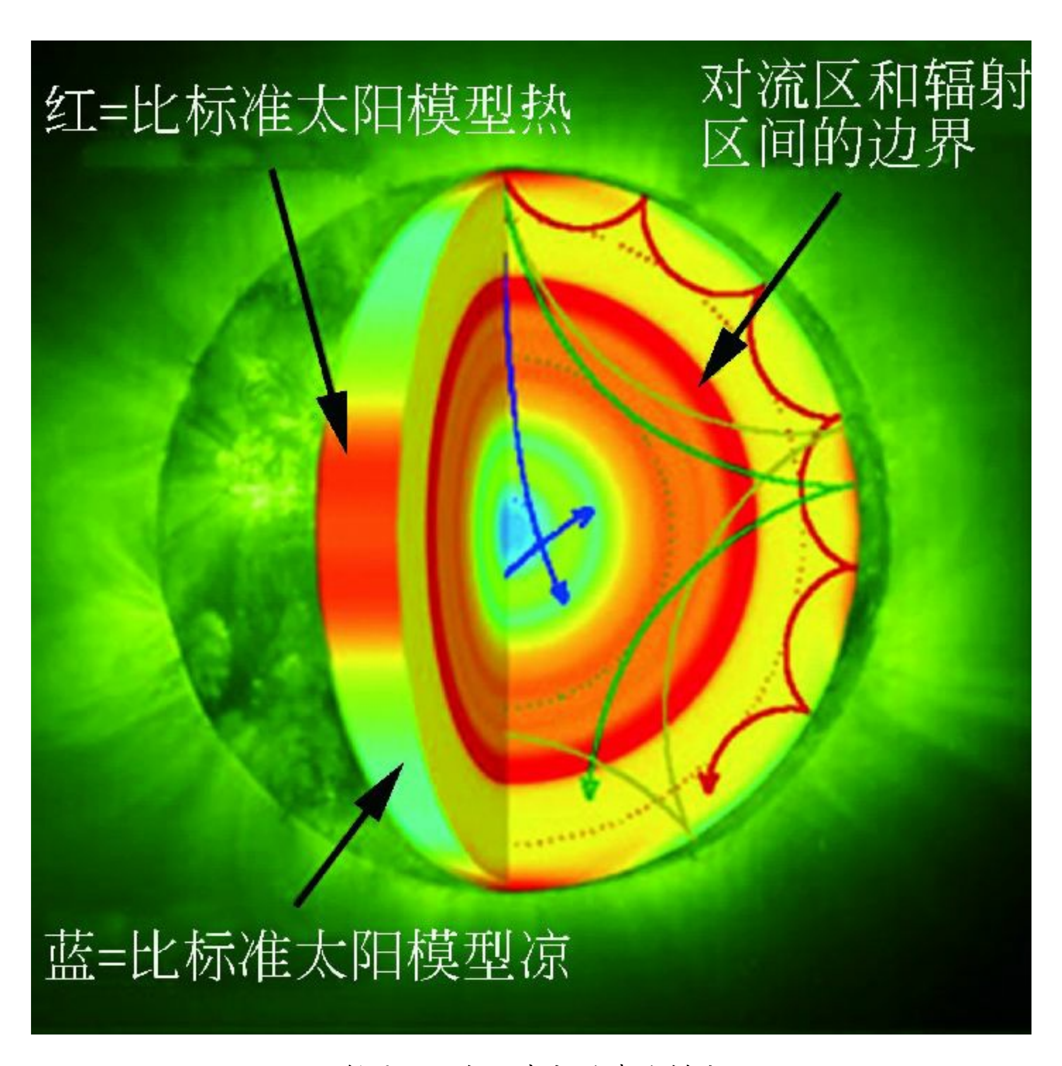
彩图8　太阳的内部结构



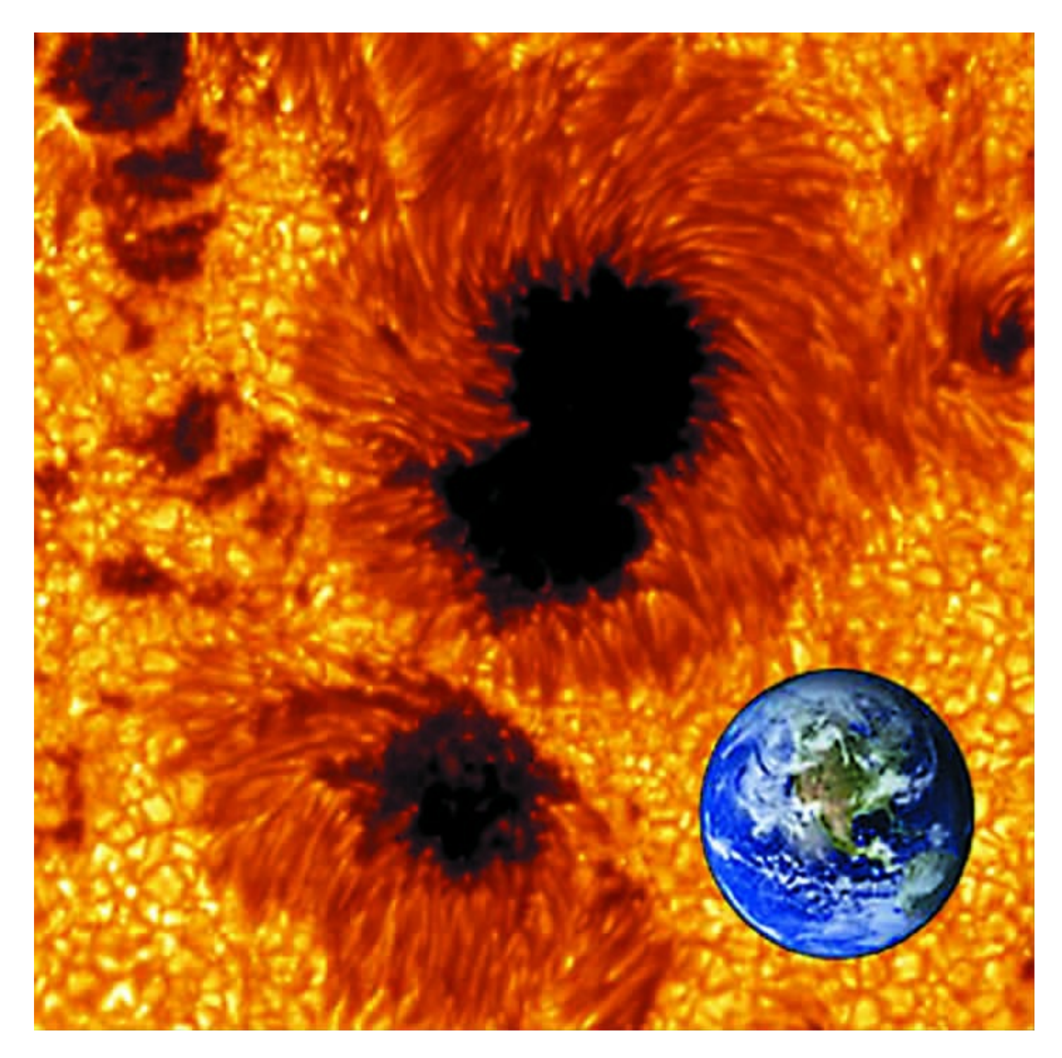
彩图9　太阳表面的“米粒”



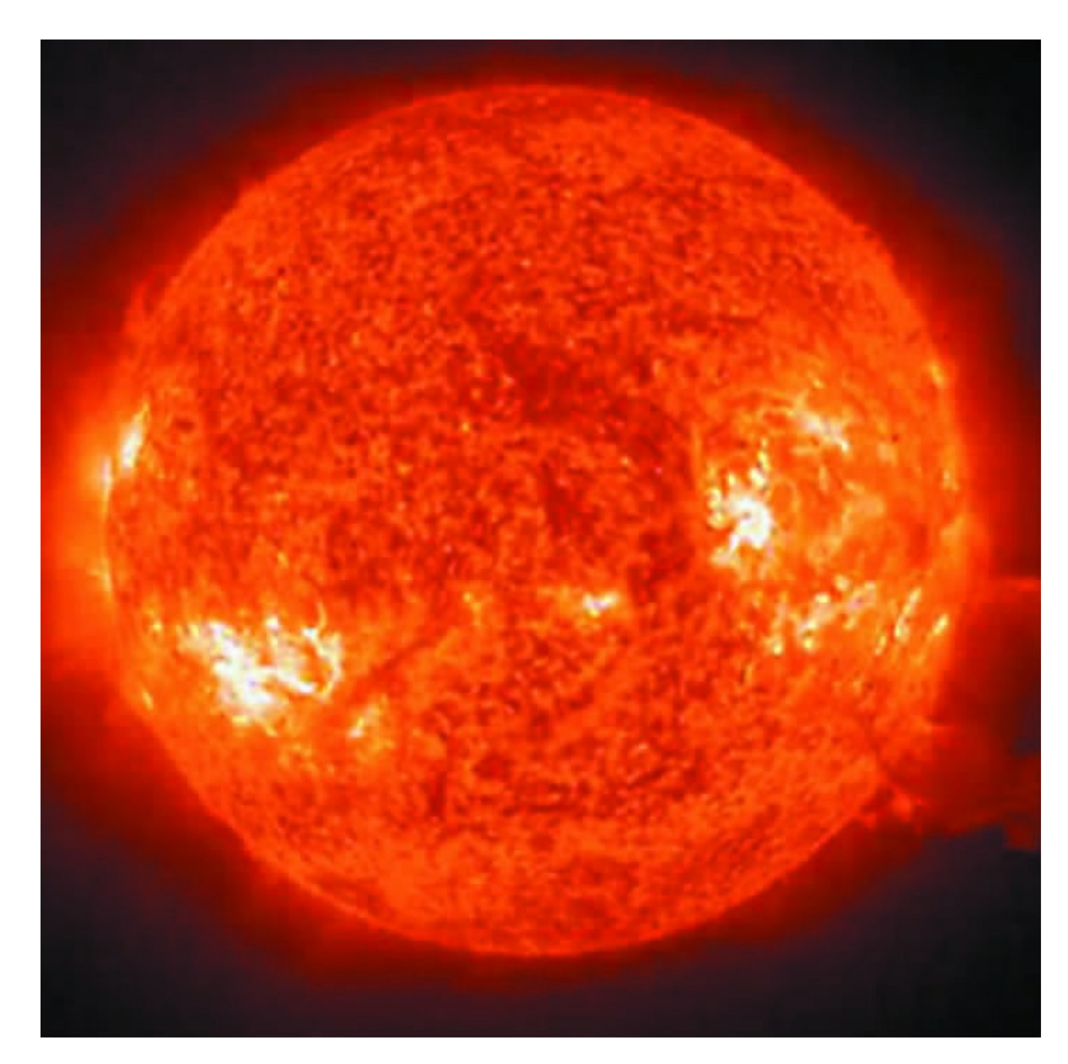
彩图10　普通流体中贝纳胞



彩图11　太阳内部的声波模式



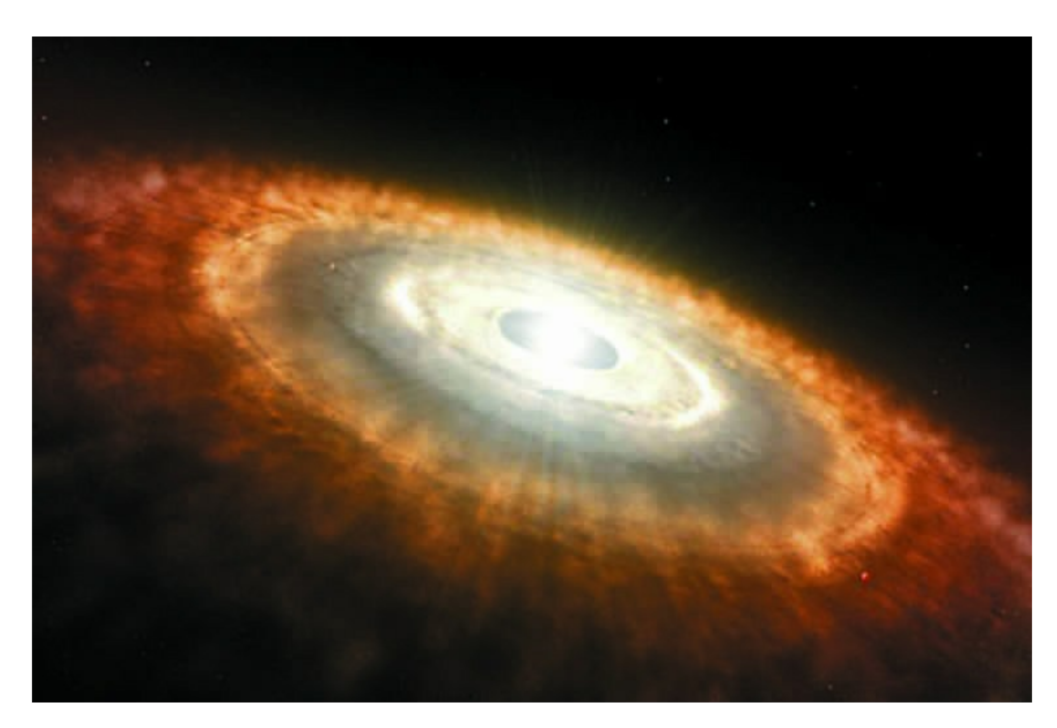
彩图12　太阳黑子（右下角的对照物为地球）



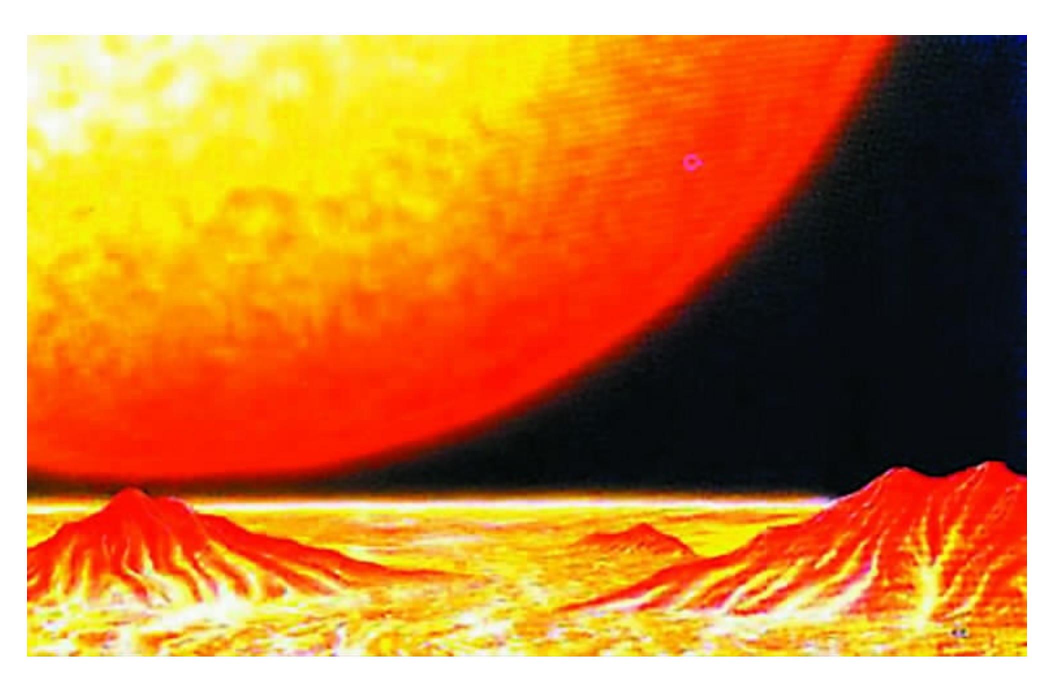
彩图13　太阳耀斑



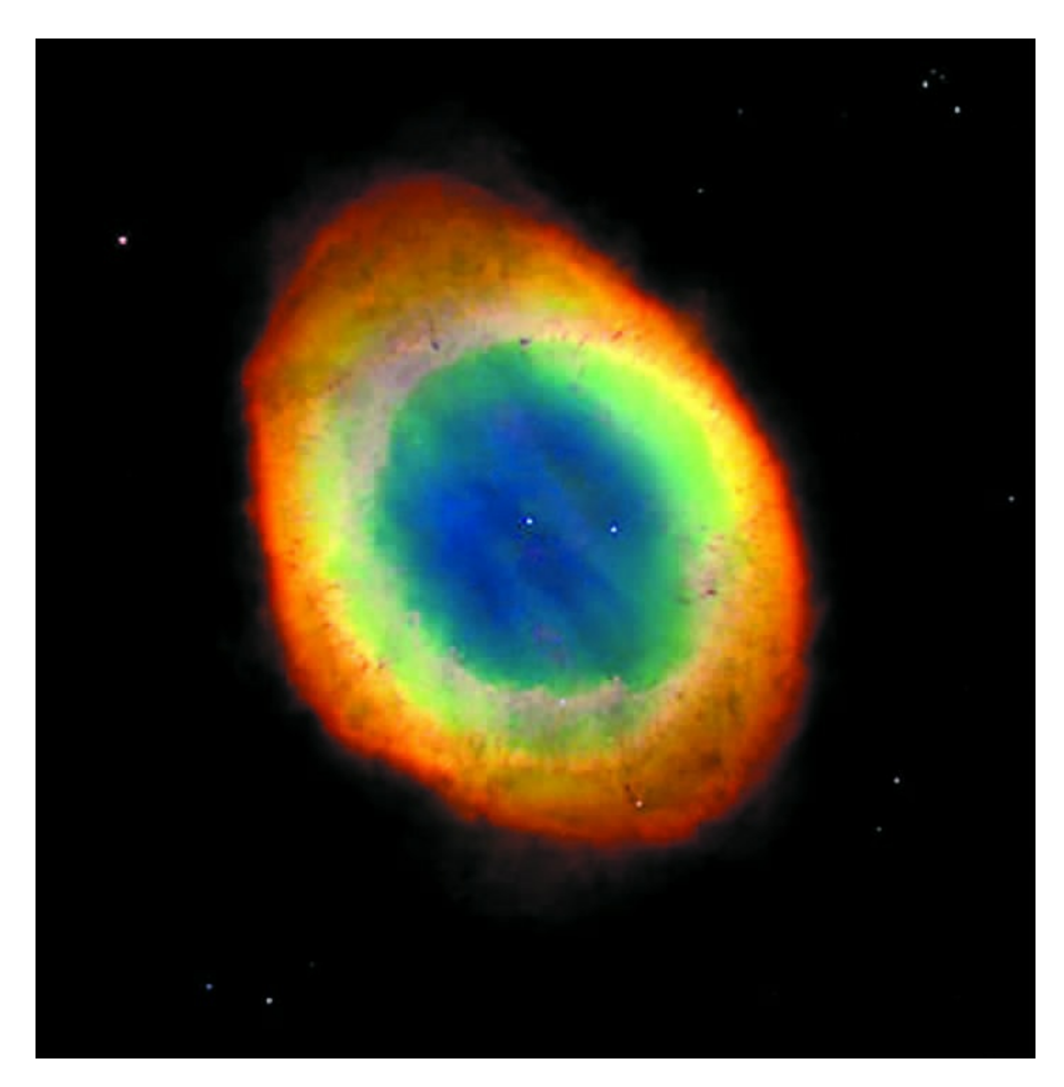
彩图14　离我们较近的分子云：猎户星云（Orion Nebula）



彩图15　原恒星与吸积盘想象图



彩图16　太阳变成红巨星后的地球想象图



彩图17　行星状星云